

UNIVERSIDADE DE LISBOA

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**MODELAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA
ÁREA MINEIRA ABANDONADA
DE CASTELEJO (GUARDA)**

Vítor Manuel Gomes de Oliveira

DOUTORAMENTO EM GEOLOGIA

(Hidrogeologia)

2010

UNIVERSIDADE DE LISBOA

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**MODELAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA
ÁREA MINEIRA ABANDONADA
DE CASTELEJO (GUARDA)**

Vítor Manuel Gomes de Oliveira

DOUTORAMENTO EM GEOLOGIA

(Hidrogeologia)

Tese orientada por

Prof. Doutora Maria Catarina Rosalino da Silva, FCL

Prof. Doutor Luís Filipe Tavares Ribeiro, IST

2010

RESUMO

O presente trabalho desenvolve-se na mina do Castelejo, uma antiga exploração de urânio hoje desactivada, situada no planalto beirão, próximo de Gouveia, na base da Serra da Estrela. A área é actualmente objecto de recuperação ambiental por parte da empresa encarregue de gerir os passivos ambientais decorrentes da exploração mineira em Portugal.

A exploração decorreu entre 1979 e 1990 em duas cortas a céu aberto, tendo sido extraídas cerca de 1.000.000 toneladas de rocha, que produziram cerca de 132 toneladas de minério (U_3O_8). Mais tarde, em 1992, uma das cortas foi utilizada para lixiviação ácida de minério pobre, proveniente tanto desta mina, como de outras situadas nas proximidades, o que permitiu produzir ainda cerca de 22,5 toneladas de U_3O_8 .

Os dados das análises de águas, resultantes da monitorização química a furos e poços localizados no perímetro da área mineira, foram tratados através de análise multivariada, tendo resultado na caracterização hidrogeológica preliminar da área mineira.

Foram efectuadas duas campanhas de prospecção geofísica, com vista à caracterização da fracturação, no sentido de proceder à determinação de vias de escoamento preferencial da água. Os resultados obtidos foram cruzados e complementados com análise de lineamentos e informação retirada da bibliografia.

Os objectivos prosseguidos com a realização do trabalho visam a caracterização hidrogeoquímica e hidrogeológica da envolvente da área mineira, efectuada por aplicação de um modelo de especiação do urânio e da modelação do escoamento e transporte, com base na informação recolhida.

O trabalho tem ainda em vista avaliar a possível contaminação da água subterrânea relacionada com as actividades mineiras, bem como a sua eventual dispersão.

ABSTRACT

The present work takes place on Castelejo mine, an old uranium exploration currently inactive, located near Gouveia, on Beirão plateau at Serra da Estrela base level.

The area is currently undergoing environmental remediation by the company in charge of managing the environmental liabilities arising from mining in Portugal.

Exploitation took place between 1979 and 1990 in two open pits, having been drawn about 1,000,000 tons of rock, which produced around 132 tonnes of ore (U_3O_8). Later, in 1992, one open pit was used for acid leaching of low-grade ore, both from this mine as from others located nearby, allowing further production of about 22.5 tonnes of U_3O_8 .

The data analysis of water, from monitoring chemical holes and wells located within the boundaries of the mining area, were treated by multivariate analysis, resulting in the preliminary hydrogeologic characterization of the mining area.

There two geophysical campaigns for the characterization of fracturing have been made, in order to identify preferential paths of water flow. Obtained results were cross-checked and supplemented with lineament analysis and other data taken from literature.

The objectives pursued with the completion of work aimed at the characterization of the hydrogeochemical and hydrogeological environment of the mining area, by means of an uranium speciation model and the modeling of flow and transport, based on information collected.

The work also aims to assess the possible groundwater contamination related to mining, and its eventual dispersal.

MODELAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA ÁREA MINEIRA ABANDONADA DE CASTELEJO (GUARDA)

PALAVRAS-CHAVE

Antigas minas de urânio
Prospecção geofísica
Geoestatística aplicada à prospecção
Análise multivariada de dados
Modelo de escoamento e transporte

HYDROGEOLOGICAL MODELING OF ABANDONED MINING AREA OF CASTELEJO (GUARDA)

KEYWORDS

Old uranium mining
Geophysical surveying
Geostatistics applied to geophysical surveying
Multivariate data analysis
Flow and transport model

Agradecimentos

São tantos os que contribuíram para a realização deste trabalho, que receio não me conseguir lembrar de todos. Perdoem-nos os que não constam desta breve lista, porque tal facto será decerto mais devido a esquecimento, do que a ingratidão.

Ao Ministério da Justiça, pela equiparação a bolseiro concedida, sem a qual não teria sido possível dar início ao trabalho.

Ao IGeoE pela cedência da cartografia em formato digital.

À Amélia Dill pela enorme disponibilidade e pela prospecção geofísica.

Uma grande palavra de apreço para os meus muitos amigos do actual Laboratório Nacional de Energia e Geologia (ex-Instituto Geológico e Mineiro, IGM).

À Elsa e ao Rui, pela ajuda na interpretação das SEV's.

Ao Luís Martins e ao Dr. Amaral Brites, pelos meios disponibilizados.

Ao Sr. Arsénio pelo trabalho de campo efectuado.

Ao Filipe e a Acúrcio Parra, pelo material bibliográfico e pelas sugestões.

Ao Ruben, pela carta de lineamentos.

Ao Augusto Costa e à Ana Pereira, pelo ensaio de traçagem.

À EDM, em particular à Eng^a Sofia Barbosa e à Eng^a Helena Gomes, pelo acompanhamento e cedência de dados.

Ao Eng^o Carlos Ferreira e ao Dr. Campos, da ENU pela disponibilidade de meios e pessoal manifestadas.

Ao Dr. Guimas pela disponibilidade total.

Ao Sr. Luís Lima pela ajuda no trabalho de campo.

Ao João e à Sónia pela ajuda sempre presente.

Ao Luís pelo estímulo e à Catarina pelo desvelo.

À JNICT, pelo apoio no Projecto POCTI/ECM/47983/2002.

Adenda

A prospecção geofísica efectuada no presente trabalho foi realizada no âmbito do Projecto POCTI/ECM/47983/2002, financiado pela JNICT, em que foram parceiros o Instituto Superior Técnico e o Instituto Geológico e Mineiro.

A prospecção geofísica RMT-R contou com o apoio do Professor Imre Müller – a quem se agradece a disponibilidade manifestada -, do Centro de Hidrogeologia da Universidade de Neuchâtel, Suíça, tendo a aparelhagem utilizada sido por si especificamente desenvolvida para fins hidrogeológicos.

As figuras 5-6 a 5-9 foram elaboradas pela Professora Doutora Amélia Carvalho Dill, na sequência da prospecção RMT-R, agradecendo-se a sua cedência para utilização no presente trabalho.

À Rosa,

ao Gonçalo e à Carolina

ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. TRABALHO DE BASE E OBJECTIVOS PROPOSTOS	3
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA MINEIRA DE CASTELEJO	4
2.1. CLIMATOLOGIA	4
2.1.1. <i>Temperatura</i>	5
2.1.2. <i>Precipitação</i>	6
2.1.3. <i>Insolação</i>	7
2.1.4. <i>Solo</i>	7
2.1.5. <i>Evapotranspiração</i>	8
2.2. GEOLOGIA	9
2.3. TECTÓNICA	11
2.4. A ÁREA MINEIRA DE CASTELEJO	12
3. A DISTRIBUIÇÃO DO U EM PORTUGAL	15
3.1. REGIÃO URANÍFERA DAS BEIRAS	15
4. GEOFÍSICA	17
4.1. INTRODUÇÃO	17
4.2. MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS UTILIZADOS	18
4.3. CONCEITOS UTILIZADOS	18
4.3.1. <i>Resistividade</i>	18
4.3.2. <i>Indução</i>	20
4.4. ELECTROMAGNETISMO “VERY LOW FREQUENCY” (VLF)	21
4.4.1. <i>Princípios físicos - Emissores VLF e campo primário</i>	21
4.4.2. <i>Propagação das ondas VLF</i>	22
4.4.3. <i>Desfasamento das ondas</i>	22
4.4.4. <i>Anomalias das ondas</i>	23
4.4.5. <i>Acoplamento entre campo primário e estrutura condutora</i>	23
4.4.6. <i>Profundidade de investigação</i>	24
4.4.7. <i>Instrumentação de medida</i>	24
4.4.8. <i>Casos teóricos</i>	24
4.4.9. <i>VLF-Resistividade</i>	25
4.4.9.1. <i>Metodologia</i>	27
4.4.9.2. <i>Resistividade</i>	27
4.4.9.3. <i>Desfasamento</i>	27
4.4.9.4. <i>Interesse hidrogeológico das medidas</i>	28
4.4.9.5. <i>O modo direcciona</i>	28
4.4.9.6. <i>Metodologia</i>	28
4.4.9.7. <i>Resistividade</i>	28
4.4.9.8. <i>Desfasamento</i>	29
4.4.9.9. <i>Tratamento dos dados</i>	29
4.4.9.10. <i>Interesse das medidas</i>	29
4.5. SONDAGENS ELÉCTRICAS VERTICAIS (SEV’s)	29
4.5.1. <i>Princípios do método</i>	29
4.5.2. <i>Sondagens Eléctricas Verticais - Schlumberger</i>	33
5. PROSPECÇÃO GEOFÍSICA EFECTUADA NA VIZINHANÇA DA ÁREA MINEIRA DE CASTELEJO	35
5.1. EMPREGO DO MÉTODO VLF-EM	35
5.1.1. <i>Descrição</i>	35
5.1.2. <i>Resultados obtidos</i>	37
5.2. EMPREGO DO MÉTODO VLF-R	43
5.2.1. <i>Descrição</i>	43
5.2.2. <i>Resultados</i>	43
5.3. APLICAÇÃO DAS SONDAGENS ELÉCTRICAS VERTICAIS	47
5.3.1. <i>Relatório da campanha</i>	47
5.3.2. <i>Resultados</i>	48

5.4. ABORDAGEM GEOESTATÍSTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS NA PROSPECÇÃO VLF-EM	53
5.4.1. <i>Objectivos e metodologia</i>	53
5.4.1.1. Abordagem utilizada	53
5.4.2. <i>Variografia</i>	56
5.4.2.1. Construção do variograma	57
5.4.3. <i>Krigagem</i>	59
5.4.3.1. Estimação da proporção e morfologia das fracturas	62
6. CARACTERIZAÇÃO DA FRACTURAÇÃO	67
6.1. A FRACTURAÇÃO NA MINA DE CASTELEJO	69
6.1.1. <i>Mapa de lineamentos</i>	69
6.1.2. <i>Outros estudos de fracturação</i>	74
6.2. A INFLUÊNCIA DA TECTÓNICA RECENTE NA CIRCULAÇÃO FISSURAL NA MINA DE CASTELEJO	76
7. GEOMATEMÁTICA	79
7.1. INTRODUÇÃO	79
7.2. ÂMBITO DO ESTUDO	79
7.3. COMPLETAMENTO DOS DADOS	81
7.3.1. <i>Método gráfico de probabilidade</i>	81
7.3.2. <i>Regressão linear múltipla</i>	83
7.4. FUNDAMENTOS DA ANÁLISE EM COMPONENTES PRINCIPAIS	86
7.5. RESULTADOS OBTIDOS	88
7.6. SÍNTESE	94
8. ESCOAMENTO E TRANSPORTE	97
8.1. INTRODUÇÃO	97
8.2. ENSAIO DE TRAÇAGEM	98
8.3. SLUG-TEST	105
8.4. TEMPERATURA	107
8.5. PIEZOMETRIA	108
8.5.1. <i>Atenuação de dados – o método LOWESS</i>	108
8.5.2. <i>Atenuação das séries piezométricas</i>	110
8.6. MODELAÇÃO	116
8.6.1. <i>Modelo conceptual do local</i>	116
8.6.2. <i>Modelo de escoamento e transporte</i>	120
8.6.2.1. Modelo de escoamento	123
8.6.2.2. Modelo de transporte	125
9. COMPORTAMENTO QUÍMICO DO URÂNIO	127
9.1. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS METAIS	127
9.1.1. <i>Radioactividade</i>	130
9.2. GEOQUÍMICA DO URÂNIO	136
9.2.1. <i>Estados de oxidação</i>	136
9.2.2. <i>Sorção</i>	140
9.2.2.1. Coeficientes de distribuição, K_d , para o U (VI)	141
9.3. ASPECTOS GERAIS DA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO DO URÂNIO	142
9.3.1. <i>Mineração e extracção do urânio</i>	145
9.3.2. <i>Enriquecimento de urânio</i>	145
9.3.3. <i>Tratamento da água de mina</i>	146
9.4. TOXICOLOGIA DO URÂNIO	147
9.4.1. <i>Efeitos na saúde</i>	149
10. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA	154
10.1. EVOLUÇÃO GEOQUÍMICA DAS ÁGUAS	154
10.2. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁGUAS – DADOS DE CAMPO	155
10.2.1. <i>pH</i>	156
10.2.2. <i>Temperatura</i>	158
10.2.3. <i>Potencial Redox (Eh)</i>	160
10.2.4. <i>Condutividade</i>	162
10.3. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁGUAS – DADOS DE LABORATÓRIO	164
10.3.1. <i>Diagramas de Piper</i>	164

10.3.2. <i>Diagramas de Stiff</i>	169
10.4. ESPECIAÇÃO DO URÂNIO	174
10.4.1. <i>Resultados obtidos</i>	175
11. CONCLUSÕES	182
12. BIBLIOGRAFIA	186
APÊNDICE I – CARACTERÍSTICAS DOS FUROS	191
APÊNDICE II – FOTOS DA MINA DE CASTELEJO	200

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1	
Figura 1-1 – Evolução anual do custo do U_3O_8 (US \$ / Libra de peso)	2
Capítulo 2	
Figura 2-1 – Clima de Portugal Continental (segundo Köppen)	4
Figura 2-2 – Temperatura média do ar – valores médios anuais (período de 1961-1990)	5
Figura 2-3 – Precipitação média – valores médios anuais (período de 1961-1990)	6
Figura 2-4 – Insolação média anual (período de 1961-1990)	7
Figura 2-5 – Carta de solos de Portugal Continental	8
Figura 2-6 – Evapotranspiração real em Portugal Continental – valores médios anuais	9
Figura 2-7 – Extracto da carta geológica onde se localiza a mina de Castelejo	10
Figura 2-8 – Zonas paleogeográficas e tectónicas do Maciço Hespérico	11
Figura 2-9 – Mina de Castelejo	13
Capítulo 3	
Figura 3-1 – Região uranífera das Beiras	16
Capítulo 4	
Figura 4-1 – Princípio do método VLF-EM	20
Figura 4-2 – Transmissores VLF mais importantes	21
Figura 4-3 – Fundamentos do método VLF	22
Figura 4-4 – Resposta do método VLF-R (RMT) em diferentes estruturas	22
Figura 4-5 – Anomalia do componente magnético sobre um condutor vertical	25
Figura 4-6 – Anomalia do componente magnético nos limites de um condutor	25
Figura 4-7 – Descrição do método electromagnético VLF multifrequência 12-240 KHz	26
Figura 4-8 – Elemento cilíndrico atravessado por uma corrente eléctrica	30
Figura 4-9 – Fluxo de corrente com origem num eléctrodo superficial	31
Figura 4-10 – Fluxo de corrente com origem em dois eléctrodos superficiais	31
Figura 4-11 – Configuração de eléctrodos utilizada no dispositivo de Schlumberger	32
Figura 4-12 – Dispositivo de Schlumberger	33
Figura 4-13 – Linhas equipotenciais e de corrente num solo homogéneo	33
Figura 4-14 – Gráfico bi-logarítmico de <i>resistividade aparente vs. distância</i>	34
Capítulo 5	
Figura 5-1 – Método VLF-EM: instalação em viatura automóvel	36
Figura 5-2 – Planta fotográfica do local onde foi efectuada prospecção VLF-EM	37
Figura 5-3 – Trajectos percorridos na prospecção, indicando-se o início e fim de cada perfil	38
Figura 5-4 – Interpretação dos resultados obtidos através dos perfis efectuados	39
Figura 5-5 – Carta sumária de fracturação da zona em estudo	42
Figura 5-6 – Extracto da carta geológica, com implantação dos perfis efectuados	43
Figura 5-7 – Estruturas geológicas principais detectadas	44
Figura 5-8 – Logs de resistividade sectoriais	45
Figura 5-9 – Perfil 6, realizado ao longo do vale de falha principal	46
Figura 5-10 – Localização e orientação das SEV's	47
Figura 5-11 – Modelo ajustado à SEV 1	48
Figura 5-12 – Dados de campo da SEV 2	49
Figura 5-13 – Modelo ajustado à SEV 2	49
Figura 5-14 – Dados de campo da SEV 3	50
Figura 5-15 – Modelo obtido da inversão da SEV 3	50
Figura 5-16 – Dados de campo da SEV 4	51
Figura 5-17 – Modelo obtido da inversão dos dados transformados da SEV 4	51
Figura 5-18 – Modelo obtido da inversão da SEV 5	52
Figura 5-19 – Campo de trabalho e amostragem utilizada	54
Figura 5-20 – Locais em que foram detectadas falhas/fracturas	55
Figura 5-21 – Variograma experimental omnidireccional e modelo teórico ajustado	59
Figura 5-22 – Aspecto da morfologia apresentada pelo campo após a estimação	64
Figura 5-23 – Carta de fracturação extraída da Figura 5-5	65

Capítulo 6

Figura 6-1	– Carta neotectónica de Portugal Continental	68
Figura 6-2	– Mapa de lineamentos dos arredores da mina de Castelejo	69
Figura 6-3	– Mapa de zonas húmidas dos arredores da mina de Castelejo	70
Figura 6-4	– Mapa de lineamentos e zonas húmidas dos arredores da mina de Castelejo	71
Figura 6-5	– Diagramas de rosa relativos ao mapa de lineamentos representado nas Figuras 6-2 e 6-4	73
Figura 6-6	– Carta sumária de fracturação das imediações da mina de Castelejo	74
Figura 6-7	– Falha de desligamento, segundo Anderson	76
Figura 6-8	– Orientação da tensão e tipos de fracturas originadas por tectónica de desligamento	77
Figura 6-9	– Diagrama de rosa, relativo ao comprimento total dos lineamentos	78

Capítulo 7

Figura 7-1	– Planta fotográfica da área em apreço	80
Figura 7-2	– Análise em Componentes Principais – anos de 1991 a 2001	90
Figura 7-3	– Análise em Componentes Principais – anos de 2002 a 2005	91

Capítulo 8

Figura 8-1	– Localização dos furos/piezómetros existentes na mina de Castelejo	97
Figura 8-2	– Camião-cisterna dos Bombeiros de Gouveia junto ao local de traçagem	98
Figura 8-3	– Injecção de uranina no furo	99
Figura 8-4	– Injecção de solução no furo, notando-se o seu sobre-enchimento	99
Figura 8-5	– Injecção de água no furo, com vista a uma melhor dispersão do traçador	100
Figura 8-6	– Disposição geral, distâncias e potenciais dos furos utilizados no método de triangulação	100
Figura 8-7	– Cálculo da direcção do escoamento e do gradiente hidráulico	101
Figura 8-8	– Carro-tanque dos Bombeiros de Gouveia utilizado na limpeza do furo de traçagem	103
Figura 8-9	– Injecção de água, com vista à limpeza do furo de traçagem	103
Figura 8-10	– Injecção de água no furo	104
Figura 8-11	– Injecção de água no furo (outra perspectiva)	104
Figura 8-12	– Registo <i>nível da água vs. tempo</i> no furo de injecção (F1) no decurso do ensaio de traçagem	105
Figura 8-13	– Adaptação do método de Hvorslev à disposição geométrica do piezómetro	106
Figura 8-14	– Projecção do rebaixamento em função do tempo com aplicação ao método de Hvorslev	106
Figura 8-15	– Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro F1	110
Figura 8-16	– Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro F2	110
Figura 8-17	– Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro F3	111
Figura 8-18	– Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro F5	111
Figura 8-19	– Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro F6	111
Figura 8-20	– Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro F10	112
Figura 8-21	– Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro PP1	112
Figura 8-22	– Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro PP1A	112
Figura 8-23	– Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro PP2	113
Figura 8-24	– Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro PP2A	113
Figura 8-25	– Evolução do nível da água ao longo do tempo – Poço P1	113
Figura 8-26	– Evolução do nível da água ao longo do tempo – Poço P2	114
Figura 8-27	– Evolução do nível da água ao longo do tempo – Poço P3	114
Figura 8-28	– Evolução do nível da água ao longo do tempo – Poço P4	114
Figura 8-29	– Evolução do nível da água ao longo do tempo – Poço P5	115
Figura 8-30	– Furos efectuados no decurso dos trabalhos de caracterização prévia da mina de Castelejo	116
Figura 8-31	– Processo de alteração e decomposição de um maciço granítico	117
Figura 8-32	– Mapa de localização dos furos e traçado de iso-altitudes das cotas de boca	118
Figura 8-33	– Mapa de localização dos furos e direcção do corte geológico interpretativo	119
Figura 8-34	– Corte geológico interpretativo segundo a direcção A'-A	120
Figura 8-35	– Discretização da área estudada	121
Figura 8-36	– Condições de fronteira utilizadas no modelo	122
Figura 8-37	– Recta de calibração do modelo matemático	124
Figura 8-38	– Escoamento subterrâneo na área modelada	124
Figura 8-39	– Escoamento subterrâneo e trajectória das partículas na área modelada	125
Figura 8-40	– Corte longitudinal (direcção N-S) ilustrando a trajectória das partículas na área modelada	126
Figura 8-41	– Corte transversal (direcção E-W) ilustrando a trajectória das partículas na área modelada	126

Capítulo 9

Figura 9-1	– Tabela periódica dos elementos	128
Figura 9-2	– Cadeia de decaimento do ^{238}U , com indicação dos períodos de semi-vida (simplificada)	133
Figura 9-3	– Cadeia de decaimento do ^{235}U , com indicação dos períodos de semi-vida (simplificada)	134
Figura 9-4	– Cadeia de decaimento do ^{232}Th , com indicação dos períodos de semi-vida (simplificada)	135
Figura 9-5	– Diagrama de Eh-pH exibindo as espécies aquosas predominantes de urânio	137
Figura 9-6	– Diagrama de Eh-pH exibindo a região (de cor creme) de sobressaturação da uraninite (UO_2)	138
Figura 9-7	– Vias ambientais possíveis para que o urânio produza efeitos potenciais na saúde humana	148
Figura 9-8	– Representação conceptual de um modelo Farmacocinético Fisiologicamente Baseado	150

Capítulo 10

Figura 10-1	– Evolução do pH no furo F2 durante as amostragens efectuadas	156
Figura 10-2	– Evolução do pH no furo F10 durante as amostragens efectuadas	156
Figura 10-3	– Evolução do pH no furo PP1 durante as amostragens efectuadas	157
Figura 10-4	– Evolução do pH no furo PP1A durante as amostragens efectuadas	157
Figura 10-5	– Evolução da Temperatura no furo F2 durante as amostragens efectuadas	158
Figura 10-6	– Evolução da Temperatura no furo F10 durante as amostragens efectuadas	158
Figura 10-7	– Evolução da Temperatura no furo PP1 durante as amostragens efectuadas	159
Figura 10-8	– Evolução da Temperatura no furo PP1A durante as amostragens efectuadas	159
Figura 10-9	– Evolução do Eh no furo F2 durante as amostragens efectuadas	160
Figura 10-10	– Evolução do Eh no furo F10 durante as amostragens efectuadas	160
Figura 10-11	– Evolução do Eh no furo PP1 durante as amostragens efectuadas	161
Figura 10-12	– Evolução do Eh no furo PP1A durante as amostragens efectuadas	161
Figura 10-13	– Evolução da Condutividade no furo F2 durante as amostragens efectuadas	162
Figura 10-14	– Evolução da Condutividade no furo F10 durante as amostragens efectuadas	162
Figura 10-15	– Evolução da Condutividade no furo PP1 durante as amostragens efectuadas	163
Figura 10-16	– Evolução da Condutividade no furo PP1A durante as amostragens efectuadas	163
Figura 10-17	– Diagrama de Piper	165
Figura 10-18	– Diagrama de Piper relativo às amostras colhidas no Furo 1	166
Figura 10-19	– Diagrama de Piper relativo às amostras colhidas no Furo 2	166
Figura 10-20	– Diagrama de Piper relativo às amostras colhidas no Furo 10	167
Figura 10-21	– Diagrama de Piper relativo às amostras colhidas no Furo PP1	168
Figura 10-22	– Diagrama de Piper relativo às amostras colhidas no Furo PP1A	168
Figura 10-23	– Diagrama de Stiff	169
Figura 10-24	– Planta aérea da área mineira e localização dos furos de monitorização	170
Figura 10-25	– Diagramas de Stiff relativos às amostras colhidas na campanha de monitorização de Mar 2008	170
Figura 10-26	– Diagramas de Stiff relativos às amostras colhidas na campanha de monitorização de Set 2008	171
Figura 10-27	– Diagramas de Stiff relativos às amostras colhidas na campanha de monitorização de Mar 2009	171
Figura 10-28	– Diagramas de Stiff relativos às amostras colhidas na campanha de monitorização de Set 2009	172

Apêndice II

Figura AII-1	– Céu Aberto I (CAI)	201
Figura AII-2	– CAI – Nova perspectiva, notando-se o crescimento de vegetação	201
Figura AII-3	– Céu Aberto II (CAII) – Perspectiva do local de desmonte do filão	202
Figura AII-4	– CAII – Outra perspectiva do local de desmonte do filão	202
Figura AII-5	– CAII – Perspectiva do fundo parcialmente seco (zona correspondente à área vermelha)	203
Figura AII-6	– CAII – A área vermelha corresponde à deposição sedimentar de metais oxidados	203
Figura AII-7	– CAII – Nova perspectiva do fundo, vendo-se também o guincho de elevação	204
Figura AII-8	– CAII – Outra perspectiva do fundo do Céu Aberto	204
Figura AII-9	– CAII – Ampliação da foto anterior	205
Figura AII-10	– CAII – Ampliação da foto anterior, destacando-se o guincho de elevação e as tubagens	205
Figura AII-11	– Dispositivo utilizado apenas na fase de laboração da mina	206
Figura AII-12	– Estação de neutralização do efluente extraído do CAII	206
Figura AII-13	– Outra perspectiva da estação de neutralização	207
Figura AII-14	– Instalações da estação de neutralização	207
Figura AII-15	– Estação de neutralização: local de introdução da cal	208
Figura AII-16	– Estação de neutralização: circuito de passagem da solução de cal	208
Figura AII-17	– Estação de neutralização: tanque de adição de cal ($\text{pH} \approx 8-9$)	209
Figura AII-18	– Estação de neutralização: tanque de adição de cloreto de bário	209

Figura AII-19 – Estação de neutralização: novo tanque de adição de cal	210
Figura AII-20 – Estação de neutralização: canal de saída do efluente em direcção às lagoas de tratamento	210
Figura AII-21 – Lagoas de tratamento do efluente proveniente da estação de neutralização	211
Figura AII-22 – Outra perspectiva das duas lagoas de tratamento do efluente	211

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 5

Tabela 5-1	– Valores obtidos a partir da interpretação da SEV 1	48
Tabela 5-2	– Valores obtidos a partir da interpretação da SEV 2	49
Tabela 5-3	– Valores obtidos a partir da interpretação da SEV 3	50
Tabela 5-4	– Valores obtidos a partir da interpretação da SEV 4	51
Tabela 5-5	– Valores obtidos a partir da interpretação da SEV 5	52
Tabela 5-6	– Estatísticos básicos do ficheiro de partida	55
Tabela 5-7	– Resultados da variografia	58
Tabela 5-8	– Estatísticos básicos dos valores estimados	63

Capítulo 6

Tabela 6-1	– Valores estatísticos relativos aos lineamentos constantes dos mapas acima apresentados	72
------------	--	----

Capítulo 7

Tabela 7-1	– Matriz inicial completa para ACP – 1991-2001	84
Tabela 7-2	– Matriz inicial completa para ACP – 2002-2005	85
Tabela 7-3	– Resultados da ACP – Coordenadas das variáveis nos 4 primeiros eixos - 1991-2001	88
Tabela 7-4	– Resultados da ACP – Coordenadas dos indivíduos nos 4 primeiros eixos - 1991-2001	89
Tabela 7-5	– Resultados da ACP – Coordenadas das variáveis nos 4 primeiros eixos - 2002-2005	92
Tabela 7-6	– Resultados da ACP – Coordenadas dos indivíduos nos 4 primeiros eixos - 2002-2005	93
Tabela 7-7	– Resultados da Análise em Componentes Principais–ligação das variáveis e indivíduos aos eixos	95

Capítulo 8

Tabela 8-1	– Características dos furos utilizados no ensaio de traçagem	102
Tabela 8-2	– Estatísticos básicos referentes às temperaturas registadas nos fluorímetros	108
Tabela 8-3	– Parâmetros utilizados na modelação	123

Capítulo 9

Tabela 9-1	– Perturbações dos ciclos geoquímicos dos metais pela sociedade	129
Tabela 9-2	– Unidades de medida de radioactividade, dose de radiação e respectiva conversão	131
Tabela 9-3	– Média geométrica dos valores de Kd para solos do tipo areia, argila, lodo e orgânico	142
Tabela 9-4	– Efeitos críticos e limites de exposição ocupacional para urânio, tório e produtos de decaimento	152

Capítulo 10

Tabela 10-1	– Tabela-resumo das fácies hidroquímicas presentes em cada ponto ao longo das campanhas	173
Tabela 10-2	– Síntese dos pontos em que foi possível efectuar especiação	175
Tabela 10-3	– Resultados da especiação: índices de saturação da 2ª campanha de monitorização	176
Tabela 10-4	– Resultados da especiação: índices de saturação da 3ª campanha de monitorização	177
Tabela 10-5	– Resultados da especiação: índices de saturação da 4ª campanha de monitorização	178
Tabela 10-6	– Amostragem e espécies de urânio que ocorrem em maior concentração (molal)	181

Apêndice I

Tabela AI-1	– Características do Furo 1 (F1) e resultados de cada amostragem	192
Tabela AI-2	– Características do Furo 2 (F2) e resultados de cada amostragem	192
Tabela AI-3	– Características do Furo 10 (F10) e resultados de cada amostragem	193
Tabela AI-4	– Características do Furo PP1 (PP1) e resultados de cada amostragem	193
Tabela AI-5	– Características do Furo PP1A (PP1A) e resultados de cada amostragem	194
Tabela AI-6	– Furo F1-S (Furo F1-colheita superficial): resultados das análises	195
Tabela AI-7	– Furo F1-P (Furo F1-colheita em profundidade): resultados das análises	195
Tabela AI-8	– Furo F2-S (Furo F2-colheita superficial): resultados das análises	196
Tabela AI-9	– Furo F2-P (Furo F2-colheita em profundidade): resultados das análises	196
Tabela AI-10	– Furo F10-S (Furo F10-colheita superficial): resultados das análises	197
Tabela AI-11	– Furo F10-P (Furo F10-colheita em profundidade): resultados das análises	197
Tabela AI-12	– Furo PP1-S (Furo PP1-colheita superficial): resultados das análises	198
Tabela AI-13	– Furo PP1-P (Furo PP1-colheita em profundidade): resultados das análises	198
Tabela AI-14	– Furo PP1A-S (Furo PP1A-colheita superficial): resultados das análises	199
Tabela AI-15	– Furo PP1A-P (Furo PP1A-colheita em profundidade): resultados das análises	199

1. Introdução

A partir do momento em que se inicia uma exploração mineira, as actividades desenvolvidas são susceptíveis de degradar o meio ambiente envolvente provocando importantes modificações ambientais, se não forem devidamente monitorizadas e controladas de acordo com os dados provenientes da monitorização.

As principais alterações ao equilíbrio ambiental resultam, em geral, da escavação quer de uma parte da superfície terrestre, quer da produção de depósitos de resíduos de natureza vária e/ou estéreis minerais (escombreyras) quer ainda dos produtos químicos utilizados na separação/purificação do minério explorado, ocorrendo, assim, os designados: impacte hidrológico e hidrogeológico (nas águas superficiais e subterrâneas), impacte geoquímico (solos e sedimentos) e impacte bioquímico (nos seres vivos).

As características e consequências destes impactes divergem conforme o momento em que são produzidos, podendo ocasionar poluição pontual e/ou poluição difusa.

A poluição pontual ocorre quando a mina se encontra em actividade; nesta altura, se existe um controlo (monitorização) o alastramento da poluição pode ser impedido.

A poluição difusa acontece, de um modo geral, após o abandono de uma mina. Por norma, passado um tempo mais ou menos alargado sobre o encerramento desta, já não existe a preocupação de proceder às monitorizações, habitualmente realizadas aquando da sua actividade. A adopção desta postura menospreza os riscos posteriores ao encerramento da mina sem que haja qualquer tipo de prevenção que os permita debelar, e, por isso, contribui para a propagação da contaminação.

O passivo ambiental resultante da actividade mineira é expresso, em regra, pela ocorrência de concentrações anómalas (muito elevadas) de metais pesados nos sedimentos, solos e aluviões, bem como nas águas que se encontram na área de influência dessa actividade. A presença desses elementos deve-se, fundamentalmente à lixiviação dos materiais que se encontram dentro da mina e a processos de erosão e lixiviação dos materiais extraídos da mina (*Younger et al., eds, 2002*). De facto, permanecendo estes a céu aberto, ficam vulneráveis à acção do vento e da chuva, que actuam como veículos de disseminação preferenciais.

Em muitos casos desenvolve-se igualmente Drenagem Ácida de Mina (DAM) especialmente quando tem lugar a exploração de minérios metálicos em que se verifique exposição de sulfuretos a ambientes oxidantes, ou quando se proceda à lixiviação ácida de minério pobre com vista à sua concentração e posterior recuperação (*Lottermoser, 2003*).

Quando a mina é abandonada definitivamente e não existem medidas para controlar a evolução das características e dos processos de alteração no meio, as consequências nefastas vão-se agravando à medida que os anos passam. Uma das mais notórias é a contaminação das águas, quer superficiais, quer subterrâneas, que ocorre, normalmente, durante a fase de funcionamento ou após o encerramento da mina.

O impacte hidrogeológico é um problema grave em quase todas as minas subterrâneas ou a céu aberto. Para evitar ou reduzir esta contaminação podem adoptar-se uma série de medidas. Assim, quando a mina é abandonada é imprescindível que se tenha um conhecimento, o mais preciso possível, da hidrogeologia, da geologia, da composição mineralógica dos materiais, do método de exploração e do tratamento do minério. Só assim é possível serem obtidos os resultados adequados à prevenção, correcção e minimização da degradação ambiental provocada pela exploração.

O método de desmonte utilizado numa exploração mineira influencia directamente as condições hidrogeológicas presentes na região. Não raro, em concomitância com a exploração, verificam-se problemas de subsidência mineira que ocorrem devido à utilização de métodos de desmonte que não contemplam o preenchimento posterior das galerias. Observam-se, assim, em síntese, os seguintes efeitos ambientais:

Assentamentos diferenciais;
Fracturas no terreno;
Rebaixamento dos níveis freáticos;
Diminuição dos caudais dos aquíferos ou mesmo o seu esgotamento;
Contaminação das águas.

Pode dizer-se que Portugal passou ao longo da sua história por várias épocas de importante exploração mineira, sendo mesmo um dos países em que mais bem impressa ficou a exploração mineira levada a cabo pelos Romanos.

De Norte a Sul do País foram registadas, entre outras que cremos não terem sido inventariadas, 55 explorações mineiras romanas, na maioria de ouro, das quais várias se mantiveram em actividade até um passado muito recente (*Nunes, 1983*).

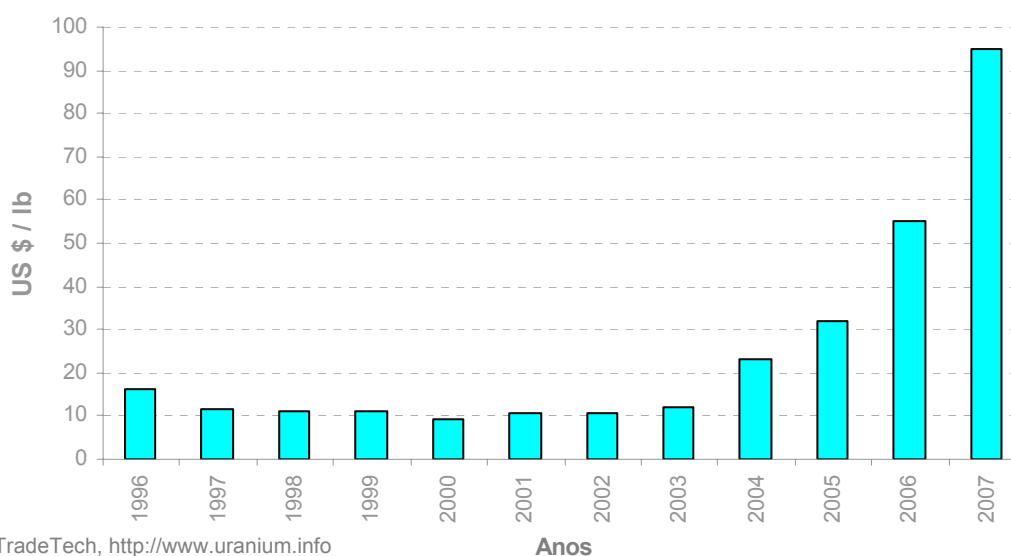
Existem em Portugal aproximadamente 175 áreas mineiras abandonadas, das quais algumas dezenas se encontram actualmente em fase de requalificação ambiental.

Da totalidade de áreas mineiras abandonadas, cerca de 60 são antigas explorações de Urânio. Data de 1907 a descoberta do jazigo urano-radífero da Urgeiriça. Daí até 1944 apenas se procedeu à exploração de rádio no país, tendo apenas a partir dessa data tido início a exploração e produção de urânio, a qual viria a encerrar-se em 2001, com a conclusão das operações de processamento de minério, que tinham lugar na Urgeiriça.

As explorações de U foram sendo abandonadas à medida do decrescimento do seu interesse estratégico e económico, tendo a última exploração mineira deste metal radioactivo sido encerrada no início dos anos 90 do século XX.

A tendência económica actual é, no entanto, de apreciação do valor económico do U, disposição para a qual concorrem factores tais como o aumento do preço do petróleo ou o empenho de alguns países na aquisição ou construção de diversos equipamentos de base nuclear (Figura 1-1).

Evolução do preço de concentrados de U ("yellowcake" ou U_3O_8)



Fonte: TradeTech, <http://www.uranium.info>

Figura 1-1 – Evolução anual do custo do U_3O_8 (US \$/libra de peso).

Na passada década de 1990, encarou-se a possibilidade de exploração das minas de Nisa. No entanto, a viabilidade da exploração dependia do preço do urânio, que teria de se situar acima dos 20 US \$/lb (US Dólares/libra de peso, 1 libra de peso \approx 454 grama) mas então oscilava

entre os 18 US \$/lb e os 19 US \$/lb. Nos últimos anos, contudo, o preço disparou e as previsões actuais apontam mesmo no sentido de poder duplicar ou subir ainda mais.

1.1. Trabalho de base e objectivos propostos

O presente trabalho desenvolve-se na mina do Castelejo, uma antiga exploração de urânio hoje desactivada, situada no planalto beirão, próximo de Gouveia, na base da Serra da Estrela.

A área é actualmente objecto de recuperação ambiental por parte da Empresa de Desenvolvimento Mineiro (EDM), empresa encarregue de gerir os passivos ambientais decorrentes da exploração mineira em Portugal.

A exploração decorreu entre 1979 e 1990 em duas cortas a céu aberto, tendo sido extraídas cerca de 1.000.000 toneladas de rocha, que produziram cerca de 132 toneladas de minério (U_3O_8).

Mais tarde, em 1992, uma das cortas foi utilizada para lixiviação ácida de minério pobre, proveniente tanto desta mina, como de outras situadas nas proximidades, o que permitiu produzir ainda cerca de 22,5 toneladas de U_3O_8 .

Seguidamente apresenta-se uma descrição sucinta do trabalho efectuado. Assim, procedeu-se inicialmente ao enquadramento da área estudada em Sistema de Informação Geográfica com cartografia em formato digital.

Seguiu-se a construção de um mosaico de fotografia aérea orto-rectificada e geo-referenciada cobrindo a área em apreço.

Os dados das análises de águas, resultantes da monitorização química a furos e poços efectuada pela Empresa Nacional de Urânio (ENU) no perímetro da área mineira, foram tratados através de análise multivariada, tendo resultado na caracterização hidrogeológica da área mineira (*Oliveira et al., 2003*). Desta forma, o tratamento dos dados relativos às análises químicas das águas permitiu discriminá-las, com vista à compreensão das relações existentes nas suas composições.

Foram efectuadas duas campanhas de prospecção geofísica, com vista à caracterização da fracturação, no sentido de proceder à determinação de vias de escoamento preferencial da água. Os resultados obtidos foram cruzados e complementados com análise de lineamentos e informação retirada da bibliografia.

Os objectivos prosseguidos com a realização do trabalho visam a caracterização hidrogeológica da envolvente da área mineira, que será efectuada através do estabelecimento de um modelo de escoamento e transporte, com base na informação recolhida.

O trabalho tem ainda em vista avaliar a possível contaminação da água subterrânea relacionada com as actividades mineiras, bem como a sua eventual dispersão.

2. Caracterização da área mineira de Castelejo

A antiga exploração de urânio de Castelejo, situa-se a cerca de 2 km a W da povoação de Vila Cortês da Serra, no concelho de Gouveia, distrito da Guarda. A mina de Castelejo situa-se na zona do Planalto Beirão, a uma altitude média próxima de 450 m. Integra-se na bacia hidrográfica do Rio Mondego, através do Ribeiro do Paço, para onde se dirige o escoamento natural.

A região estudada é abrangida pela Folha 202 (Linhares - Celorico da Beira) da Carta Militar de Portugal - Série M888, na escala 1/25000 e pela Folha 17-D (Gouveia) da Carta Geológica de Portugal, na escala de 1/50000 (Teixeira *et al*, 1967).

2.1. Climatologia

O clima de Portugal Continental depende da sua situação geográfica, designadamente da latitude e posição relativamente ao Oceano Atlântico, bem como do relevo.

A classificação climática principal de Köppen, divide o clima do globo terrestre em 5 grandes regiões climáticas, de clima polar, clima temperado com Inverno rigoroso, clima temperado com Inverno suave, clima seco e clima tropical húmido.

Exceptuando o clima seco, calculado com base na precipitação e evapotranspiração da região, a classificação assenta essencialmente nas temperaturas médias de cada região, socorrendo-se igualmente da precipitação, com vista à definição de sub-regiões.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima de Portugal Continental enquadra-se no clima temperado com Inverno suave, subdividindo-se o território em duas zonas: uma zona de clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e quente (Csa) e uma zona de clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e pouco quente (Csb) – veja-se Figura 2-1.

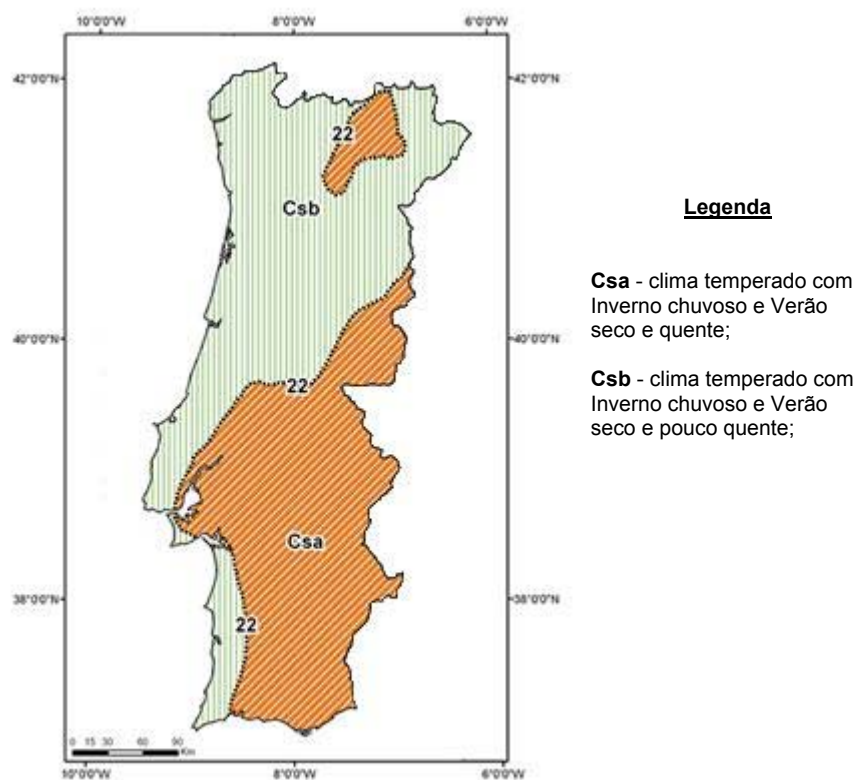


Figura 2-1 – Clima de Portugal Continental, segundo Köppen
(fonte: Instituto Meteorologia, <http://www.meteo.pt/pt/areaeducativa/otempo.eoclima/clima.pt/index.html>)

É nesta última subzona, de clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e pouco quente (Csb) – Figura 2-1, que se localiza a mina de Castelejo.

Com vista à caracterização climática da região em estudo recorremos aos dados do perfil climático de Portugal Continental, disponibilizados pelo Instituto de Meteorologia, baseados em elementos referentes aos anos de 1961-1990.

2.1.1. Temperatura

De acordo com a Figura 2-2, que representa os valores médios anuais da temperatura do ar, os

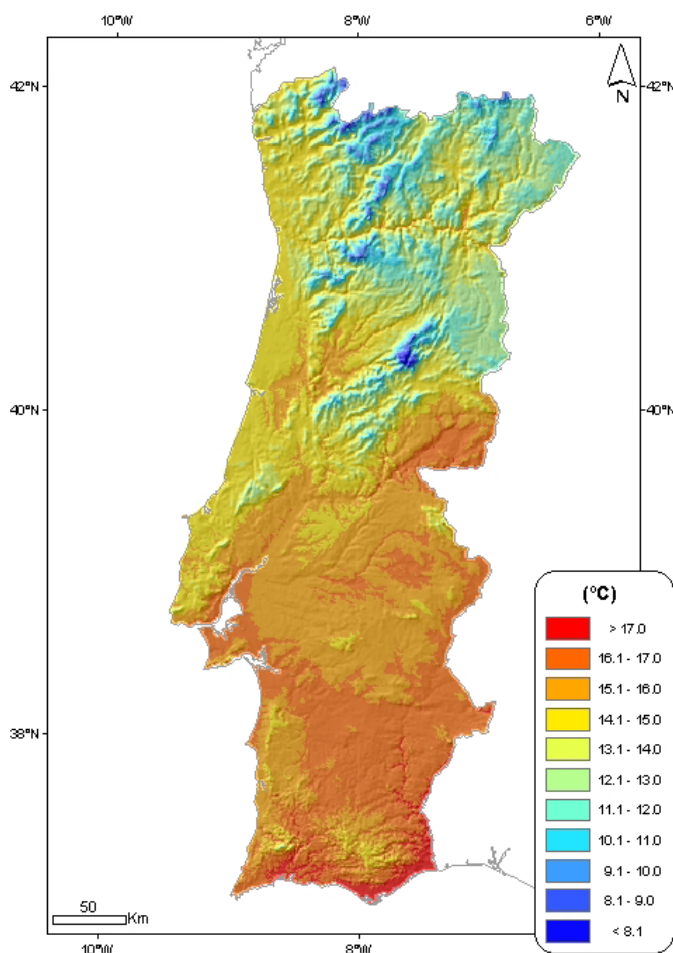


Figura 2-2 – Temperatura média do ar - valores médios anuais (período de 1961-1990)
(fonte: Instituto Meteorologia, <http://www.meteo.pt/pt/areaeducativa/otempo.eoclima/clima.pt/index.html>)

maiores valores verificam-se a Sul, sendo superiores a 17 ° C, enquanto que os menores valores ocorrem a Norte, com temperaturas médias inferiores a 8 ° C.

Na zona estudada, a temperatura média anual do ar no local em estudo situa-se no intervalo entre 13.1 ° C e 14.0 ° C.

2.1.2. Precipitação

Quanto aos valores médios anuais da precipitação no território do Continente, os mesmos situam-se próximo dos 900 mm (ver Figura 2-3).

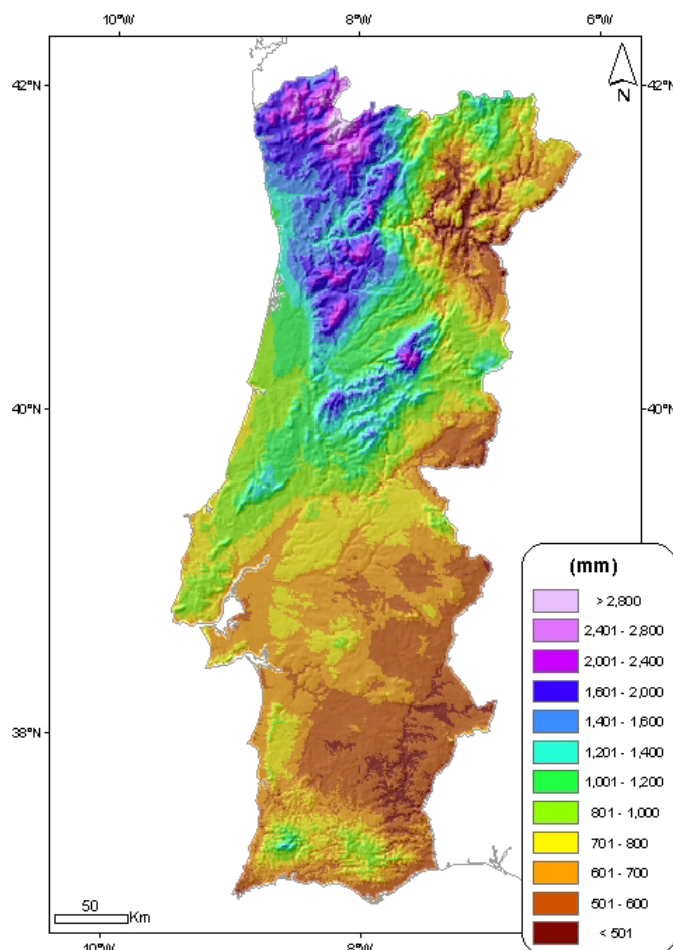


Figura 2-3 – Precipitação média - valores médios anuais (período de 1961-1990)
(fonte: Instituto Meteorologia, <http://www.meteo.pt/pt/areaeducativa/otempo.eoclima/clima.pt/index.html>)

De facto, a distribuição dos valores de precipitação média aponta para a ocorrência dos maiores valores a Norte do território (≈ 3000 mm) enquanto que os menores valores ocorrem a Sul (≈ 400 mm).

Na zona estudada, a precipitação média anual situa-se entre os 1001 mm e os 1200 mm.

De notar que apenas possuímos valores relativos aos últimos 19 anos, relativamente à estação a utilizar nos cálculos a efectuar aquando da modelação matemática (estação 10M/03UG – Mesquitela, constante do SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos) cujo valor médio será de 674.1 mm.

2.1.3. Insolação

A Figura 2-4 ilustra a insolação anual no território do Continente.

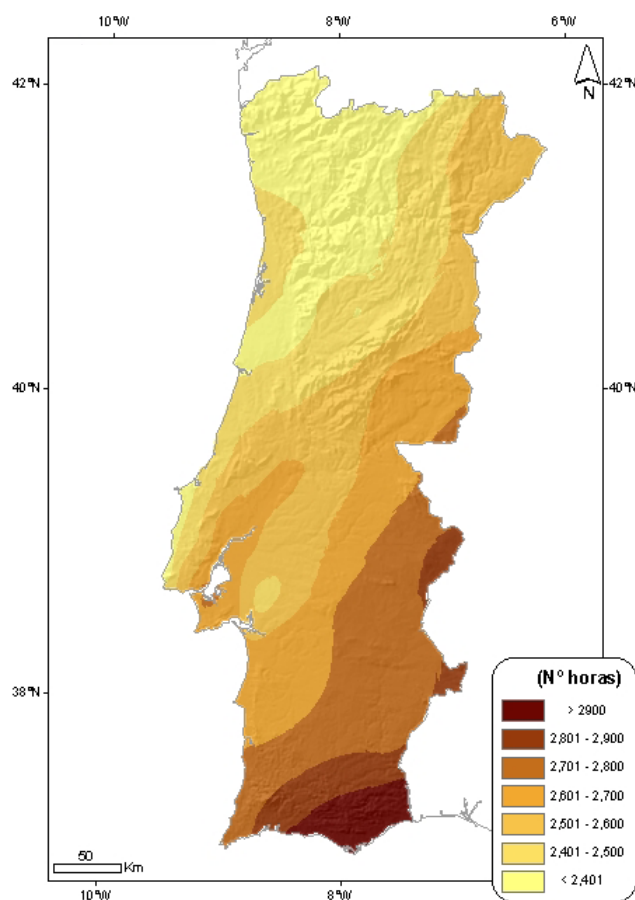


Figura 2-4 – Insolação média anual (período de 1961-1990)

(fonte: Instituto Meteorologia, <http://www.meteo.pt/pt/areaeducativa/otempo.eoclima/clima.pt/index.html>)

A distribuição dos valores de insolação média indicam que esta aumenta de Noroeste para Sudeste, sendo que a Noroeste se verificam valores inferiores a 2400 horas anuais e a Sudeste se registam valores superiores a 2900 horas anuais.

Na zona estudada, a insolação média situa-se entre as 2401 horas anuais e as 2500 horas anuais.

2.1.4. Solo

Em Portugal existem diversos tipos de solos. Na generalidade, são solos incipientes e jovens, próximos da rocha-mãe, sendo pouco influenciados pelos processos de formação do solo.

Na Figura 2-5 representa-se a carta de solos de Portugal continental, segundo a classificação da Food and Agriculture Organization of the United Nations para a Carta dos Solos da Europa (<http://www.fao.org/nr/land/soils/key-to-the-fao-soil-units-1974/it/>).

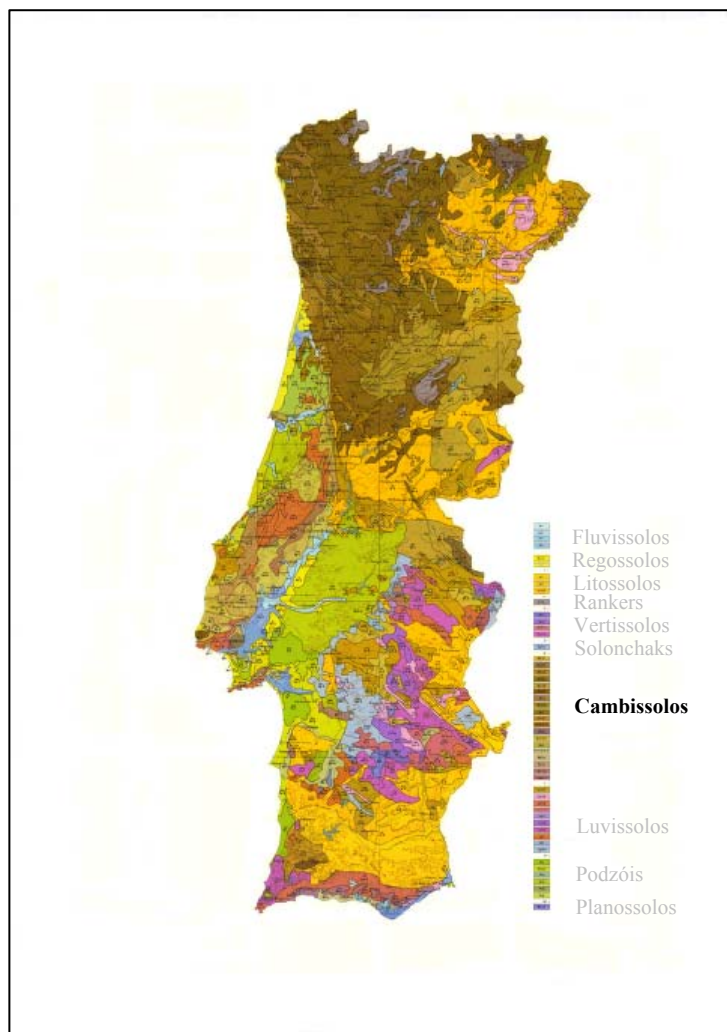


Figura 2-5 – Carta de solos de Portugal continental (adaptado de CNA, 1978).

Para o presente trabalho, os solos que nos interessam integram-se no grande grupo de solos cuja legenda se encontra realçada a negro, isto é, os Cambissolos.

Do conjunto dos Cambissolos fazem parte solos muito distintos, derivados de rochas-mãe igualmente distintas, calcárias e não calcárias.

Assumem particular interesse neste estudo os cambissolos derivados de rocha-mãe granítica, pouco evoluídos e de textura grosseira, sob os quais se localizam os aquíferos analisados.

2.1.5. Evapotranspiração

Apresentam-se na Figura 2-6 os valores da evapotranspiração real calculados para Portugal Continental.

Os valores aplicáveis à zona estudada situam-se no intervalo compreendido entre os 600 mm e os 700 mm, como se salienta na figura 2-6.

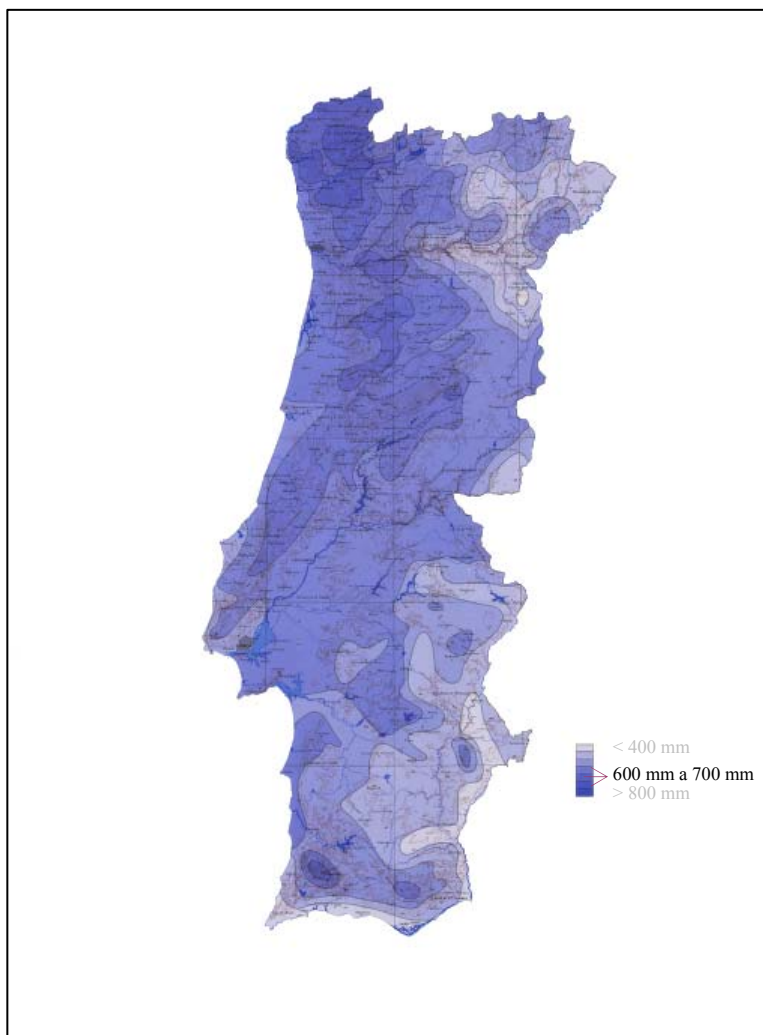


Figura 2-6 – Evapotranspiração real em Portugal Continental -Valores médios anuais (adaptado de CNA, 1978).

2.2. Geologia

Na Figura 2-7 reproduz-se a região estudada, a qual, como acima foi referido, é abrangida pela Carta Geológica de Portugal, folha 17-D (Gouveia) na escala de 1/50000 (Teixeira et. al, 1967) editada pelos Serviços Geológicos de Portugal.

Geologicamente, as litologias aflorantes na zona estudada, assinalada na figura, são (Teixeira et. al, 1967):

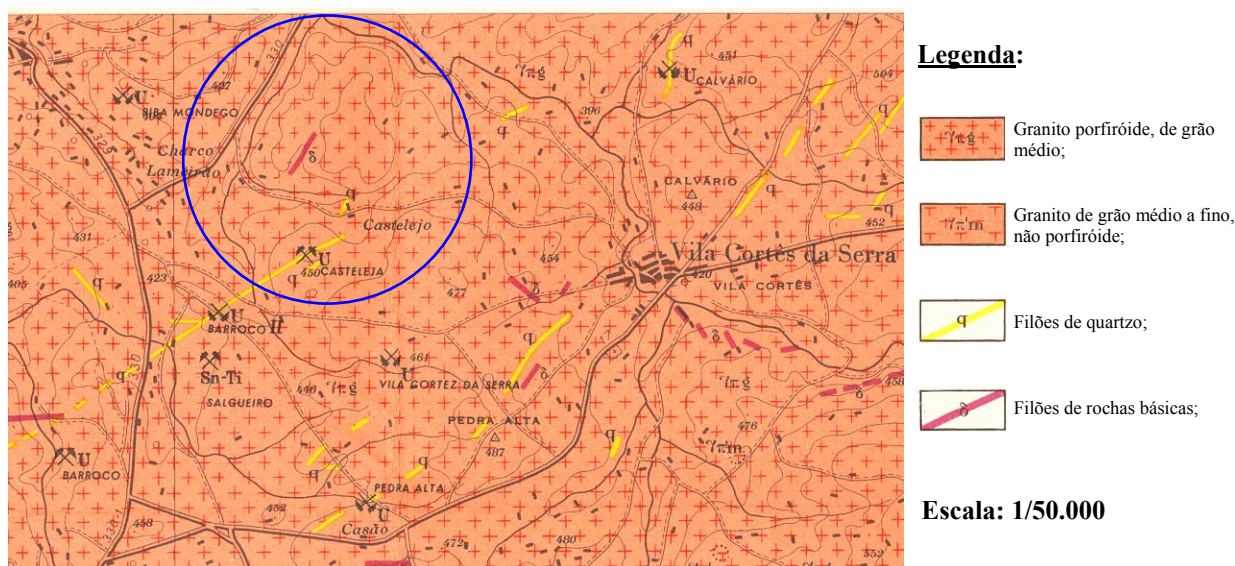


Figura 2-7 – Extracto da carta geológica onde se localiza a Mina de Castelejo
(© SGP – Serviços Geológicos de Portugal, Teixeira et al., 1967).

- Rochas Eruptivas

γ_{pg} – Granito porfiróide, de grão grosseiro ou grosseiro a médio

Embora se trate de granito porfiróide, no seio deste é possível encontrar granito de várias texturas, correspondentes a diversas diferenciações por si apresentadas. No local de interesse, encontramos perante um granito pós-tectónico, predominantemente de grão médio, tendência porfiróide, monzonítico, de duas micas com predominância da biotite sobre a moscovite.

A rocha encontra-se frequentemente alterada, por hematitização dos feldspatos.

- Rochas Filonianas

q – Filões de quartzo

Por toda a região, encontram-se filões de quartzo, mais ou menos desenvolvidos, orientados segundo as direcções NE-SW ou NNE-SSW. Tais filões são constituídos por quartzo leitoso, alternando quartzo branco e quartzo defumado. Por vezes são de jaspe e apresentam estrutura brechóide. No local de interesse, o filão de quartzo explorado no Céu Aberto I (figura 2-9) apresenta espessura próxima de 1 m, direcção N25-55E, inclinação 45-75NW e é constituído por quartzo brechificado e jasperizado. No Céu Aberto II, o filão apresenta espessura de cerca de 5 m, direcção N40E, inclinação 50-70NW e é constituído por quartzo ferruginoso, defumado e jasperizado.

δ – Filões de rochas básicas

São pouco espessos e descontínuos, apresentando-se geralmente muito alterados, transformados em argilas. São rochas normalmente de grão fino, evidenciando com frequência disjunção esferoidal. Apresentam orientação variável, embora no local de interesse se desenvolva aproximadamente segundo NE-SW.

2.3. Tectónica

O território continental português é formado por um núcleo antigo e endurecido, normalmente designado por Maciço Hespérico, que constitui cerca de 2/3 do território, e por terrenos de cobertura.

O Maciço Hespérico (por vezes igualmente chamado de Meseta Ibérica, embora este último termo tenha uma génese essencialmente geomorfológica) compreende terrenos antigos, ante-Mesozóicos, constituídos por rochas sedimentares, eruptivas e metamórficas.

Os terrenos de cobertura englobam rochas sedimentares e algumas rochas eruptivas, Meso-Cenozóicas, que formam as orlas Ocidental e Meridional do País, bem como depósitos modernos, constituídos por aluviões e diferentes níveis de praia, de que resultam diversas bacias de enchimento sedimentar (Teixeira, 1966, Ribeiro *et al.*, 1979).

O Maciço Hespérico é atravessado pela Cordilheira Central, conjunto de elevações dispostas segundo a direcção ENE-WSW, que o divide em duas metades: A Meseta Norte, de altitude média de 800 m e a Meseta Sul, com altitude média próxima dos 400 m.

As formações que constituem o Maciço Hespérico, fundamentalmente xistos, grauvaques, granitos e quartzitos, sofreram a acção das orogenias Caledónica, Hercínica e Alpina, sendo, no entanto, a orogenia Hercínica aquela cujos efeitos melhor aqui se encontram documentados.

A zonalidade paleogeográfica e tectónica do orógeno permite demarcá-lo em zonas internas e externas, cuja descrição é a seguinte (Figura 2-8):

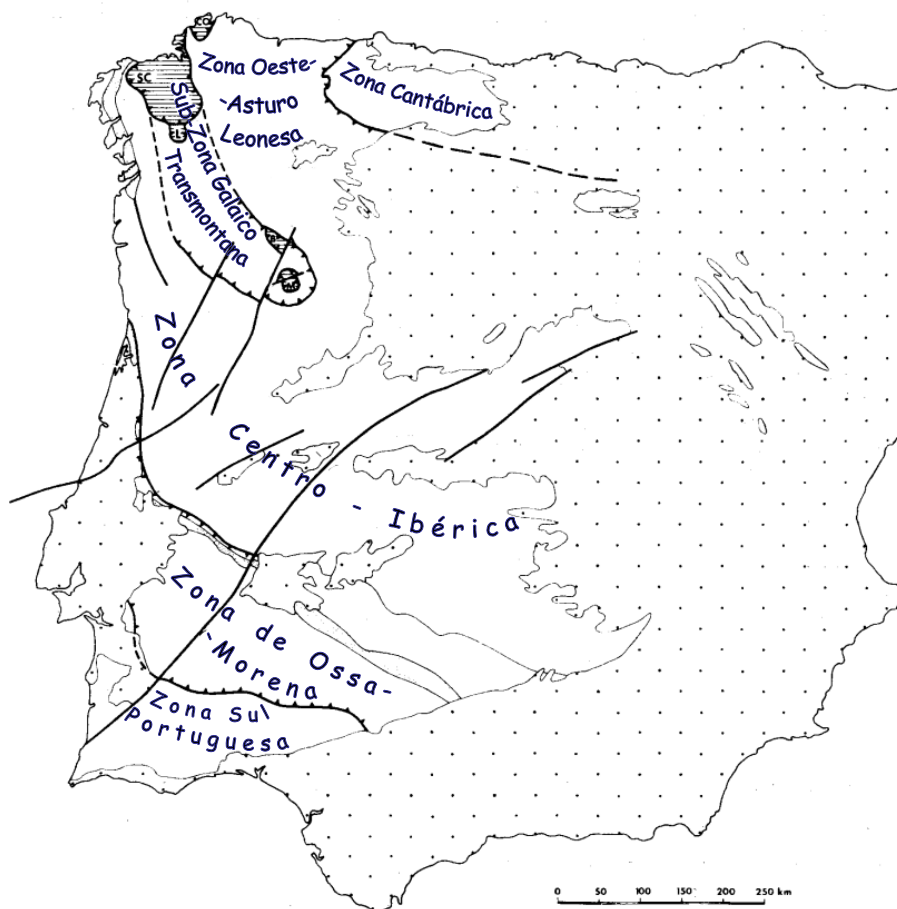


Figura 2-8 – Zonas paleogeográficas e tectónicas do Maciço Hespérico (adaptado de Ribeiro *et al.*, 1979).

- Zonas Internas, de que fazem parte a Zona Oeste-Asturo Leonesa, a Zona Centro-Ibérica (bem como o seu sector NE, a Sub-Zona Galaico Transmontana) e a Zona de Ossa-Morena, caracterizadas por deformação intensa, magmatismo e metamorfismo sin-orogénicos, encontrando-se o Precâmbrico e Paleozóico Inferior bem representados.

- Zonas Externas, de que fazem parte a Zona Cantábrica e a Zona Sul Portuguesa, onde o Paleozóico Superior se encontra mais bem representado, a deformação é mais tardia e menos intensa e onde o magmatismo e metamorfismo sinorogénicos são menos pronunciados.

Na Península Ibérica, a orogenia Hercínica teve início no Devónico Médio tendo prosseguido até ao Carbónico terminal. Embora se tenha desenvolvido ao longo de diversos estádios, podem individualizar-se duas fases principais:

- Uma 1ª fase, que se prolongou desde o Devónico Médio até ao Viséano e que afectou sobretudo as zonas internas;

- Uma 2ª fase, datada do Vestefaliano;

As acções da orogenia originaram dobramentos de orientação geral NW-SE, bem como magmatismo sinorogénico e metamorfismo regional.

Entre o Vestefaliano Superior e o Pérmico Superior, a cadeia Hercínica sofre movimentos de levantamento, resultados da erosão e acções intrusivas pós-tectónicas, principalmente constituídas por granitóides alcalinos e calco-alcalinos, em relação com as quais se originaram consideráveis mineralizações de carácter filoniano.

As últimas fases da orogenia Hercínica induziram intensa fracturação no Maciço, originando diversos movimentos de levantamento e afundamento.

Já no decurso do Cenozóico, o Maciço Hespérico voltaria de novo a sofrer fracturação, agora predominantemente de direcção NE-SW, em consequência das acções da orogenia Alpina que então se fizeram sentir.

Com a intrusão dos granitos Hercínicos encontra-se relacionada a formação tardia de filões quartzosos, tendo alguns sido objecto de exploração.

Em fase sequente à intrusão granítica, verificou-se igualmente a instalação de filões básicos em fracturas daquele.

Toda a região foi depois submetida às acções da orogenia Alpina, que a viriam a fracturar intensamente.

Em fracturas com esta origem e direcção NE-SW ou NNE-SSW, viriam a instalar-se filões quartzo-jaspóides, mais ou menos ferruginosos, os quais contêm muitas vezes mineralização uranífera.

2.4. A área mineira de Castelejo

Com base no que atrás ficou dito, designadamente em termos geológicos e tectónicos, pode caracterizar-se a mina de Castelejo como localizando-se num granito Hercínico pós-tectónico, monzonítico, de duas micas, de grão médio e tendência porfiróide. As mineralizações ocorrem associadas a filões de quartzo, e são normalmente constituídas por fosfatos hidratados de U – uranocircite, autunite, torbernite e sabugalite -, minerais secundários provenientes da alteração da uraninite e outros compostos de urânio.

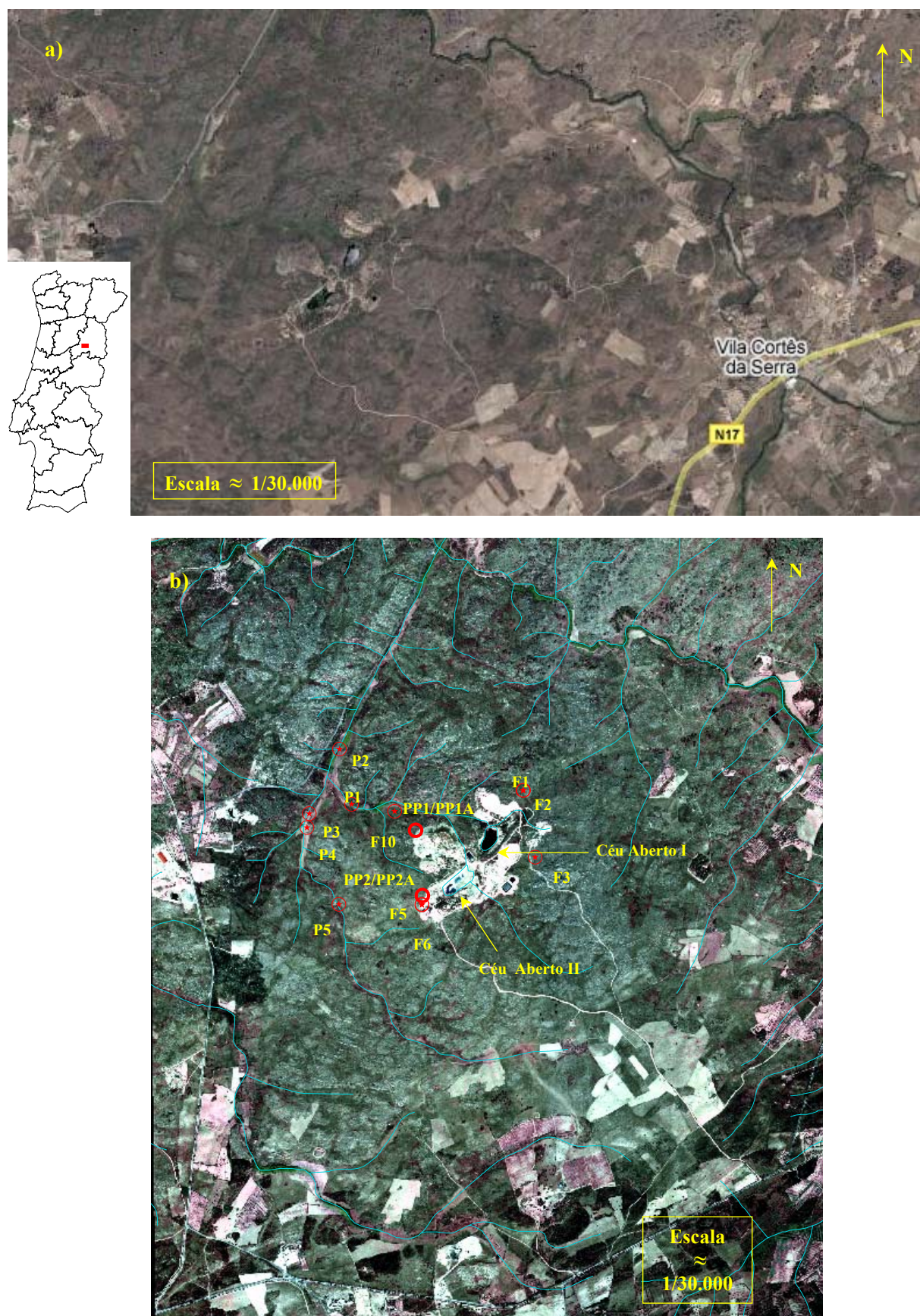


Figura 2-9 – Mina de Castelejo

a) Enquadramento e vista geral (© Google Maps); b) Vista geral com localização dos pontos de água utilizados na monitorização (© IGP - Instituto Geográfico Português).
Legenda: P – Poços, F – Furos/piezómetros, PP – Pares piezométricos.

A sua descoberta ocorreu em 1957, na sequência de trabalhos de prospecção e reconhecimento levados a cabo pela Junta de Energia Nuclear. Curiosamente, a sua exploração nunca chegou a ser concessionada.

Os trabalhos - que compreenderam prospecção eléctrica, cintilométrica, abertura de sanjas, poços de reconhecimento e realização de sondagens - permitiram distinguir duas zonas mineralizadas, Castelejo I (actualmente correspondente a Céu Aberto I) e Castelejo II (actualmente correspondente a Céu Aberto II) afastadas aproximadamente 200 m entre si (Figura 2-9).

Castelejo I é composto por um filão de quartzo brechificado encaixado no granito. No contacto, o granito encontra-se muito alterado, triturado e sericitizado. O filão apresenta uma espessura entre 0,20 m e 1,20 m, variando a sua direcção entre N25E e N55E e a sua inclinação entre 45° NW e 75° NW (*Ponte, 1992*).

O filão é acompanhado a tecto por uma brecha de granito muito triturado, alterado e ferruginoso, com óxidos de ferro e manganês.

Uma falha vertical, de direcção N80W, segmenta o filão em duas secções, rejeitando-o aproximadamente 40 metros.

Castelejo II é constituído por uma brecha granítica com quartzo filoniano com impregnações feríferas. O jazigo, de direcção N40E, apresenta uma espessura máxima de 7 m, prolongando-se por aproximadamente 50 metros.

Verifica-se maior esmagamento do granito no local em que o jazigo apresenta maior envergadura, sendo nesta região que o mesmo é cruzado por uma rede de filonetes de quartzo defumado e ferruginoso.

A mineralização, essencialmente constituída por fosfatos hidratados de urânio (uranocircite, autunite, torbernite, etc.) segue as áreas de maior trituração, encontrando-se, aqui e ali, impregnações de sulfuretos e óxidos de ferro e manganês.

A exploração a partir das cortas a céu aberto antes referidas (Castelejo I e Castelejo II) decorreu entre 1979 e 1990, permitindo produzir cerca de 132 T de U_3O_8 . A partir de 1992, a produção passou a efectuar-se a partir da lixiviação ácida de minérios pobres, provenientes tanto da própria mina do Castelejo, como de outras situadas nas imediações, utilizando-se para o efeito a corta designada por Castelejo II. Este processo permitiu recuperar aproximadamente 22,5 T de U_3O_8 .

No Apêndice II apresentam-se diversas fotos, que ilustram algumas das características presentes na mina de Castelejo.

3. A distribuição do U em Portugal

A maioria dos depósitos uraníferos conhecidos situa-se no centro do País, na região abrangida pelos distritos de Viseu, Guarda, Coimbra e Portalegre, ainda que seja nos dois primeiros distritos que se concentra o maior número de explorações mineiras.

Os jazigos de urânio relacionam-se com o magmatismo Hercínico pós-tectónico, normalmente materializado por intrusões de granitos monzoníticos, de grão médio a grosseiro e tendência porfíroide, de duas micas. Dispõem-se habitualmente de acordo com a direcção NE-SW. A maior parte dos jazigos relacionam-se com filões de quartzo instalados em fracturas em granitos, que variam entre:

- NNE-SSW a NE-SW, e se situam a N e NW da Serra da Estrela;
- NNE-SSW e ENE-WSW, e se situam a NE e SE da Serra da Estrela;
- NNW-SSE e NNE-SSW, e se situam no Alentejo, próximo de Nisa;

Registam-se diversas opiniões quanto à génese dos jazigos de urânio. Assim, segundo *Neiva (1944)* a mineralização primária terá carácter hidrotermal. Já *Cerveira (1951)* estabelece ligação entre esta e a intrusão de filões básicos.

Thadeu (1965) e *Pilar (1969)* consideram que os jazigos primários terão carácter hidrotermal, considerando os secundários de impregnação como provenientes da lixiviação dos primeiros e posterior depósito em estruturas favoráveis. *Faria (1966)*, *Dias et al. (1970)* e *Cameron (1960)* expressam opiniões semelhantes, ainda que com ligeiras variantes.

Segundo *Neiva (1995)*, os jazigos filonianos, assim como os “stockworks”, deverão relacionar-se com hidrotermalismo associado às intrusões graníticas Hercínicas.

Os movimentos Alpinos vieram favorecer a circulação de águas em profundidade, as quais aqueceram e funcionaram como solubilizantes de minerais, tanto dos filões como do encaixante. Posteriormente, estas águas ascenderam e vieram a precipitar os minerais de urânio. Idêntica génese terão os jazigos puramente supergénicos, em que, em períodos de intensa actividade erosiva, os minerais primários de urânio sofreram lixiviação e subsequente precipitação.

3.1. Região Uranífera das Beiras

Os depósitos conhecidos de urânio em Portugal podem grosseiramente considerar-se provenientes de uma das duas Regiões Uraníferas em que o País se encontra sistematizado: A Região Uranífera do Alto Alentejo e a Região Uranífera das Beiras.

A Região Uranífera das Beiras localiza-se na região central de Portugal (Figura 3-1). Como se representa na Figura, os jazigos dispõem-se, “*grosso modo*”, em torno de um “*horst*” de direcção NE-SW, resultante de movimentação Alpina, que constitui a Serra da Estrela.

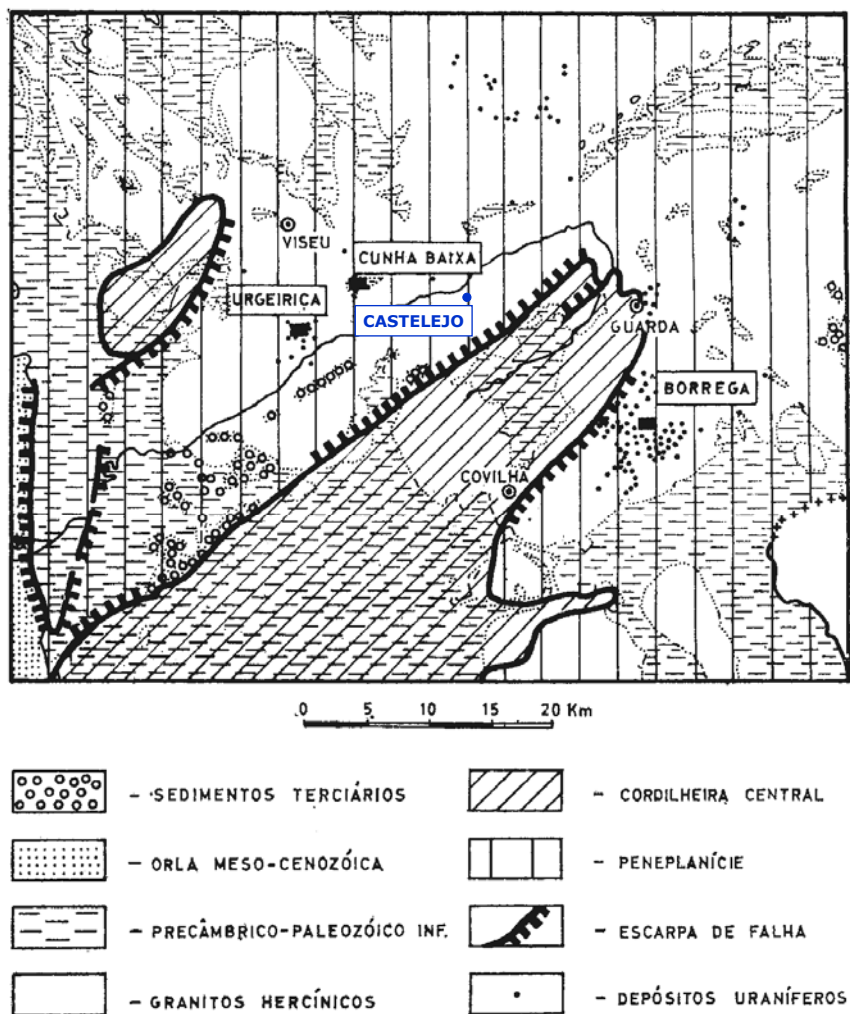


Figura 3-1 – Região Uranífera das Beiras
(adaptado de *Ferreira, 1971*).

Em termos paleogeográficos e tectónicos, encontramos-nos no domínio da Zona Centro-Ibérica (Figura 2-8) aqui caracterizada por amplas intrusões graníticas das diversas fases Hercínicas nas formações do Complexo Xisto-Grauváquico Ante-Ordovício. Existem ainda manchas de depósitos de arcoseos Terciários.

Os jazigos de urânio encontram-se nos granitos, em encraves das formações do Complexo Xisto-Grauváquico e nas orlas do metamorfismo induzido no contacto dos granitos com o encaixante.

Na Região Uranífera das Beiras existem mineralizações de Sn, Be, Ta e Nb relacionadas com pegmatitos e de Sn e W relacionadas com filões de quartzo. Não parece, todavia, existir qualquer relação entre as referidas mineralizações e as ocorrências de urânio.

4. Geofísica

4.1. Introdução

Neste trabalho, utilizaremos o termo “geofísica” sempre que nos referirmos a qualquer método que proceda à medição de parâmetros físicos utilizados nas Ciências da Terra.

Em estudos geológicos, a Geofísica é utilizada principalmente na prospecção de petróleo, água e outros recursos minerais, nos estudos de riscos naturais – sismos, vulcões, deslizamentos de terras -, e em diversas situações aplicadas, entre outros, aos campos da engenharia civil, geotecnia e agricultura.

A prospecção geofísica compreende variados métodos, usualmente agrupados em três grandes grupos: sísmicos, electromagnéticos e gravimétricos. Estes métodos podem utilizar-se em superfície, produzindo cartografia, ou em sondagens, situação em que se obtêm diagrfias. Segundo o método empregue, a resposta geofísica de uma estrutura orientada poderá ser diferente. De facto, a resposta obtida varia de acordo com o método empregue, sendo o êxito de aplicação de um dado método dependente do contraste entre a estrutura orientada e o seu encaixante.

Alguns métodos geofísicos utilizados em Hidrogeologia são:

Método	Grandeza medida (unidade)	Detector utilizado
Refracção sísmica	Velocidade de propagação (m/s)	Geofone/Hidrofone
Reflexão sísmica	Velocidade de propagação (m/s)	Geofone/Hidrofone
Eléctrico	Resistividade eléctrica (ohm.m)	Resistímetro
Electromagnetismo	Desfasamento (°)	Fasímetro
	Resistividade eléctrica (ohm.m)	Resistímetro
Magnetismo	Campo magnético terrestre (nT) ¹	Magnetómetro
Gravimetria	Campo gravítico (mGal) ²	Gravímetro
Teledeteccção	Lineamentos (tratamento de imagem)	Foto de satélite
Radiometria	Radioactividade (α , β , γ)	Cintilómetro, Espectrómetro
Geotermia	Temperatura (° C)	Termómetro

¹: nT, nanoTesla; ²: mGal, miliGal. Extraído de Müller, 1996.

A utilização destes métodos em Hidrogeologia visa aumentar a taxa de sucesso das campanhas de sondagens para prospecção de água.

Actualmente utilizam-se cada vez mais para determinar a geometria dos aquíferos, as suas reservas e as suas zonas de vulnerabilidade.

A aplicação da Geofísica à Hidrogeologia necessita de um conhecimento geofísico de base com vista a estabelecer, a partir dos dados brutos, um modelo geofísico sobre um modelo geológico, e de um conhecimento hidrogeológico que permita, a partir do modelo geológico, deduzir determinado comportamento hidráulico.

O interesse pelos métodos electromagnéticos indutivos, advém do facto destes serem sensíveis às formações condutoras do subsolo. Ora, estas formações jogam muitas vezes um papel importante no estabelecimento das direcções de escoamento e sobre as capacidades de armazenamento de água subterrânea.

Em terreno fissurado, a distinção entre rocha sã e rocha fracturada (logo, potencialmente mais transmissiva) é muitas vezes bastante favorável. Por outro lado, contrariamente à maioria dos métodos geofísicos, a maior parte das aparelhagens electromagnéticas não necessitam de contacto com o solo.

O raciocínio de que um método geofísico aplicado à Hidrogeologia possa detectar selectivamente a água explorável não é correcto. Na maior parte dos casos, a investigação geofísica apenas permite localizar as zonas aquíferas mais prováveis. Ela necessita, pois, de ser complementada com informação adicional sobre o contexto tectónico, o hidrodinamismo e a heterogeneidade das formações geológicas.

4.2. Métodos electromagnéticos utilizados

Devido à presença de minerais magnéticos nos minérios, os métodos electromagnéticos são correntemente empregues em prospecção mineira. A sua utilização em prospecção petrolífera encontra-se menos adaptada, porque os métodos electromagnéticos são sobretudo sensíveis às formações geológicas condutoras. São cada vez mais empregues em Engenharia Civil – Geotecnia – a fim de determinar a natureza dos solos ou o estado de fracturação das rochas. Uma vantagem particular destes métodos, reside na possibilidade de serem aerotransportados.

Existem numerosos métodos electromagnéticos, de classificação muito variável, em função dos critérios escolhidos. Entre eles, com base na frequência, contam-se os métodos electromagnéticos que utilizam emissores fixos e os que utilizam emissores móveis.

Iremos aqui abordar os métodos RF-EM (Radio Frequency Electromagnetics e RMT (Rádio Magnetotelluric), que utilizam emissores fixos, encerrando o capítulo com uma descrição das Sondagens Eléctricas Verticais (SEV's).

Ainda que a profundidade da prospecção dependa tanto da frequência utilizada como da resistividade do material atravessado, pode dizer-se que estes métodos se ajustam particularmente bem a prospecções hidrogeológicas que se desenvolvam a profundidades inferiores a 150 m.

4.3. Conceitos utilizados

As radiações electromagnéticas utilizadas em Geofísica possuem diversas frequências. Vamos limitar-nos às ondas hertzianas compreendidas entre 12 KHz e 250 KHz.

4.3.1. Resistividade

Os materiais terrestres são todos mais ou menos condutores de electricidade. A resistência, R , e a resistividade, ρ , de uma amostra de rocha são definidas, de acordo com a Lei de Ohm, para meios homogêneos e isotrópicos, pela seguinte relação:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho l}{S} \quad [\Omega] \quad (\text{Eq. 4-1})$$

$$\text{pelo que} \quad \rho = \frac{R S}{l} \quad [\Omega.m] \quad (\text{Eq. 4-2})$$

sendo

R = Resistência, em Ohm;
 V = Diferença de potencial eléctrico, em Volt;
 I = Intensidade da corrente eléctrica, em Ampère;
 ρ = Resistividade eléctrica, em Ohm.m;
 l = Comprimento da amostra, em m;
 S = Superfície, em m²;

O inverso da resistividade é a condutividade, σ , em Siemens/m, sendo que:

$$\sigma = 1/\rho = \frac{l}{RS} = \frac{(I/S)}{(V/l)} = \frac{J}{E} \quad (\text{Eq. 4-3})$$

com

σ - condutividade eléctrica, em S/m;
 R - resistência, em ohm;
 V - diferença de potencial eléctrico, em Volt;
 I - intensidade da corrente eléctrica, em Ampère;
 ρ - resistividade eléctrica, em ohm.m;
 l - comprimento da amostra, em m;
 S - superfície, em m²;
 E - campo eléctrico, em Volt.m⁻¹;
 J - densidade de corrente, em Ampère. m⁻².

A quantidade escalar designada por σ exprime, portanto, a proporcionalidade entre o campo eléctrico E e a densidade da corrente eléctrica J num ponto através de

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{Eq. 4-4})$$

Desta forma, para um campo dado, quanto maior for a condutividade eléctrica do material, maior será a densidade de corrente.

A resistividade, ρ , de uma rocha varia em função:

- do grau de saturação em água;
- da porosidade;
- da temperatura;
- da composição química;
- da composição mineralógica.

A resistividade eléctrica dos materiais é dos parâmetros físicos que apresenta uma das maiores variações de ordens de grandeza sobre a Terra. O seu interesse em Geofísica reside no facto de permitir diferenciar formações geológicas electricamente contrastantes. O seu interesse em Hidrogeologia reside no facto de a porosidade de certas formações (e eventualmente a sua condutividade hidráulica) poder ser avaliada a partir de relações experimentais locais.

4.3.2. Indução

De acordo com a lei de Neumann ou lei da indução, se um fluxo magnético normal a um circuito plano varia no tempo, é induzida no circuito uma força electromotriz (f.e.m.) igual em grandeza a esta taxa de variação temporal do fluxo e, sendo o circuito fechado, aí circulará uma corrente eléctrica numa direcção tal que o seu campo magnético (secundário) tende a opor-se à mudança do fluxo (primário).

Os métodos electromagnéticos são todos baseados no princípio da indução. Medem o campo magnético associado a uma corrente eléctrica que circula no subsolo. O processo pode descrever-se como (ver Figura 4-1):

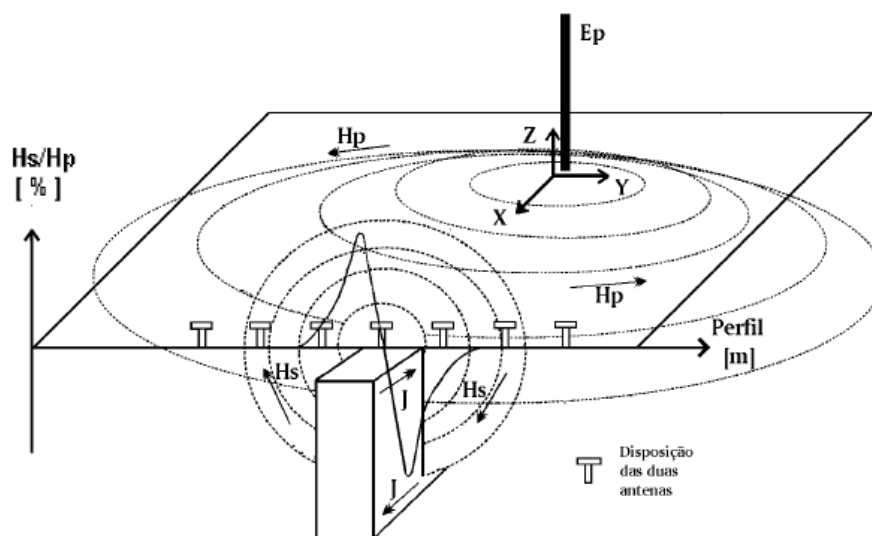


Figura 4-1 - Princípio do método VLF-EM
(adaptado de *Turberg et al., 1992*).

Uma corrente eléctrica alterna primária (eléctrodos, bobinas ou emissor) produz um campo electromagnético alterno, o qual induz uma corrente eléctrica alterna secundária nos condutores (correntes de remoinho ou correntes de Foucault).

Estas correntes eléctricas secundárias produzem um campo electromagnético secundário (induzido) que tende a opor-se ao campo electromagnético primário.

A intensidade deste campo electromagnético secundário é tanto maior, quanto mais fraca for a resistividade da estrutura, mais forte a sua susceptibilidade magnética e mais elevada a frequência de emissão. Na presença de uma estrutura electricamente condutora, o campo electromagnético medido é, pois, um campo resultante, constituído por um campo primário e um campo secundário. Tais medidas são efectuadas por intermédio de bobinas nas quais é induzida uma força electromotriz pelo campo resultante.

A medida de um campo secundário fraco, em presença de um campo primário, é muitas vezes difícil de obter. Existem, no entanto, métodos electromagnéticos que consistem em parar a emissão do campo primário e em medir, em intervalos aproximados, o decréscimo exponencial do campo secundário induzido. Este decréscimo é indicativo do tipo de estrutura condutora presente.

4.4. Electromagnetismo “Very Low Frequency” (VLF)

As transmissões na banda VLF datam de 1910. Permitiram inicialmente comunicações de longa distância, a que se seguiu uma utilização pelas forças armadas, com vista à sua comunicação com os submarinos, tendo também sido utilizadas na detecção de campos de minas.

É apenas na década de 1960 que este método foi utilizado em prospecção mineira, vindo depois a sê-lo na prospecção de água e em geotecnia.

4.4.1. Princípios físicos - Emissores VLF e campo primário

As radiações electromagnéticas utilizadas em VLF são geradas na banda de 3 a 30 KHz, por estações emissoras cuja potência varia entre 300 a 1000 Kw. As estações são estruturas complexas possuindo uma ou várias antenas filiformes, de 200 a 300 m de altura. São, pois, emissores verticais.

Estas estações possibilitam comunicações de longo alcance. Em linguagem “rádio” são ondas de frequência muito baixa, embora em geofísica sejam consideradas como ondas de frequência relativamente elevada.

Os emissores VLF são fixos. Transmitem sinais com um alcance de vários milhares de quilómetros em redor do emissor. As estações emissoras encontram-se distribuídas à superfície do globo (veja-se Figura 4-2) e transmitem, seja uma mensagem modulada sobre-imposta a uma onda portadora não modulada, seja uma onda portadora intermitente.

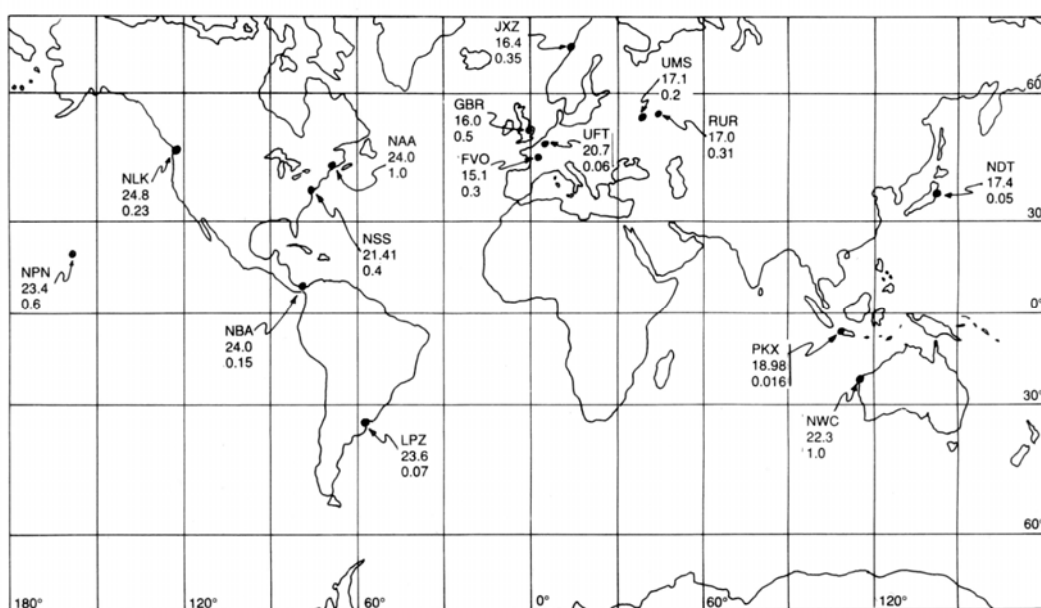


Figura 4-2 – Transmissores VLF mais importantes.
Os blocos de dados identificam a estação, a frequência (KHz) e a potência (Megawatts).
(Segundo Milsom, 1989).

Tais emissores podem assemelhar-se a fios verticais muito curtos, em relação aos comprimentos de onda transmitidos (15 Km a 20 KHz). Por esta razão, comportam-se como dipolos eléctricos. Esquemáticamente, o campo magnético primário forma círculos concêntricos em torno do emissor. O campo eléctrico associado dispõe-se verticalmente, em ângulo recto com o campo magnético. Este modelo simplificado negligencia os efeitos fonte devidos à proximidade do emissor (Figura 4-3).

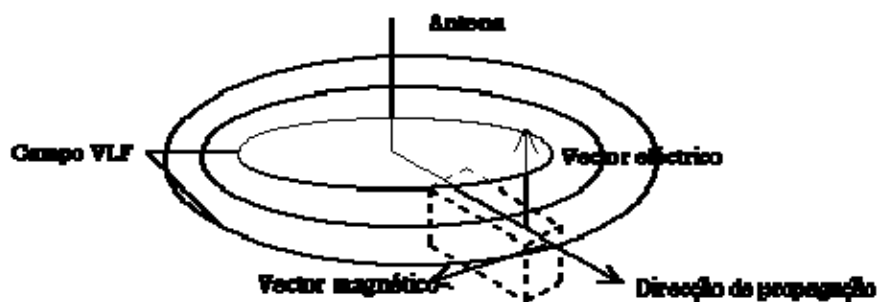


Figura 4-3 – Fundamentos do método VLF.

A tracejado representa-se um corpo condutor orientado na direcção da antena.

(Adaptado de Kearey & Brooks, 1991).

4.4.2. Propagação das ondas VLF

A grande distância do emissor (o que é geralmente o caso das prospecções VLF) a onda VLF pode ser considerada como uma onda plana. O campo magnético é horizontal e paralelo ao solo e o campo eléctrico é-lhe vertical (figura 4-7). Longe dos efeitos de fonte, este campo electromagnético primário pode praticamente ser considerado como uniforme sobre cerca de 2 Km² de terreno.

A descrição acima é simplificada, não tendo em conta que

- a antena VLF não se situa num espaço livre infinito, mas sobre a superfície terrestre;
- as ondas electromagnéticas podem ser refractadas ou reflectidas pela ionosfera e/ou pelo solo;
- as ondas VLF podem ser perturbadas pelas condições meteorológicas.

4.4.3. Desfasamento das ondas

Relativamente ao método RMT, aquando de uma medição não existe qualquer controlo, quer sobre a amplitude do sinal no emissor, quer sobre a fase. Para ter um campo electromagnético de referência mede-se, seja o campo magnético horizontal, seja o campo eléctrico vertical, já que são os mais próximos dos sinais primários (campos locais).

Próximo da superfície e sobre um solo homogéneo, o desfasamento é de $\pi/4$ (45°). Sobre solo heterogéneo (e.g. estratificado) é diferente de 45° (Figura 4-4).

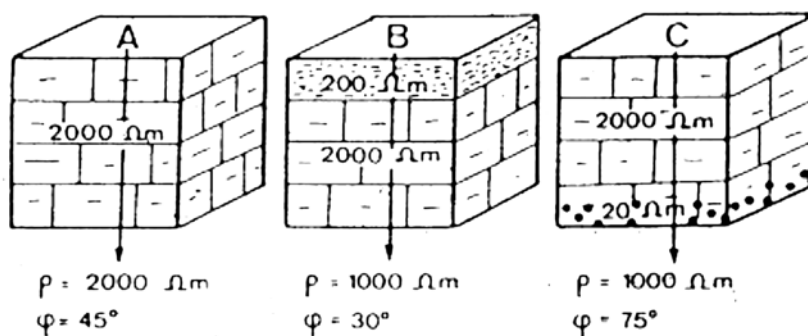


Figura 4-4 – Resposta do método VLF-R (RMT) em diferentes estruturas

A) formação homogénea; B) uma camada condutora sobrepõe-se a uma mais resistente; C) uma camada condutora é coberta por um estrato mais resistente. (Adaptado de Thierrin & Müller, 1988).

4.4.4. Anomalias das ondas

As anomalias VLF são em grande parte causadas pelas deformações que as ondas electromagnéticas sofrem ao atravessarem o subsolo. Estas deformações devem-se essencialmente às variações de condutividade daquele. Podem identificar-se dois tipos de correntes anormais:

A. Correntes rotacionais (ou de vortex)

Estas correntes são locais e associadas aos corpos confinados e condutores englobados numa matriz resistente. Neste caso, o campo magnético primário atravessa o condutor, induzindo-lhe correntes eléctricas (correntes de Foucault) que se encontram desfasadas relativamente ao campo primário, e cuja distribuição é função da geometria dos condutores. As correntes de Foucault induzem, segundo a lei da indução, um campo magnético secundário da mesma frequência que o campo primário, mas apresentando um desfasamento. São precisamente estas as perturbações (criadas por este campo secundário) que procuramos. Nas correntes rotacionais, verifica-se a produção de campos secundários magnéticos, mas não eléctricos. Estes últimos são produzidos essencialmente por indução.

B. Correntes galvânicas

Sem contraste de condutividade, as linhas de corrente seriam paralelas à superfície do solo. Pelo contrário, na vizinhança de uma anomalia de condutividade no subsolo, o campo eléctrico de uma onda electromagnética irá ser influenciado. Se a anomalia é mais condutora, as linhas de corrente tenderão a convergir na sua direcção. Se a anomalia é mais resistente, as linhas de corrente serão divergentes. Nas correntes galvânicas, há produção de campos secundários magnéticos e eléctricos, sendo estes últimos produzidos essencialmente por acumulação de cargas.

No domínio VLF, parece que os efeitos das correntes galvânicas predominam sobre os das correntes rotacionais.

A maior parte dos sistemas VLF comparam os campos magnéticos verticais e horizontais. A existência dum campo secundário indica a presença dum condutor de subsuperfície (camadas, filões, falhas) e pode ser medido (relativamente ao campo primário) por uma mudança de amplitude e/ou desfasamento. De igual modo, qualquer que seja a causa da deformação do campo resultante, ele estará polarizado elipticamente e as medidas assentam sobre a definição desta elipse de polarização.

Note-se que exactamente sobre um condutor, o campo secundário é importante, mas horizontal. A maior parte dos sistemas de cartografia electromagnética não o podem dissociar do campo primário.

4.4.5. Acoplamento entre campo primário e estrutura condutora

A indução que pode produzir um condutor de tipo filão depende bastante da orientação deste último relativamente à proveniência do campo primário (acoplamento). O acoplamento máximo é teoricamente obtido quando a direcção da estrutura é paralela à direcção de propagação da onda VLF (polarização eléctrica ou polE). O acoplamento mínimo é teoricamente obtido a 90° desta posição, quando a direcção da estrutura é perpendicular à direcção de propagação da onda VLF (polarização magnética ou polH).

4.4.6. Profundidade de investigação

Um campo electromagnético atravessando o solo é atenuado na sua amplitude. Esta atenuação é exponencial com a profundidade. É importante constatar que a onda electromagnética perde quase toda a sua energia à profundidade efectiva (também designada por profundidade pelicular ou *skin depth*). Esta é função da resistividade do meio e da frequência utilizada. De facto, a profundidade efectiva (muitas vezes associada à profundidade de investigação) define-se como sendo a profundidade à qual a amplitude do campo electromagnético, EM_p , é atenuada de um factor e (0.368) relativamente à sua amplitude de superfície, EM_0 .

$$EM_p = EM_0 \cdot e^{-1} \quad (\text{Eq. 4-5})$$

Praticamente, a profundidade efectiva, P_i , é calculada por:

$$P_i = 503 (\sigma f)^{-1/2} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (\text{Eq. 4-6})$$

com

condutividade, σ , em S.m^{-1} ;

frequência, f , em Hz;

resistividade, ρ , em ohm.m;

Esta relação mostra

- a possibilidade de efectuar sondagens fazendo variar a frequência (sondagens de frequência);
- que a profundidade de investigação varia em função da natureza dos terrenos atravessados.

4.4.7. Instrumentação de medida

Os aparelhos utilizados, CHYN/MULLER são protótipos fabricados na Suíça por Dupperex.

O aparelho VLF-R 12/25 é um VLF-Resistividade em sentido estrito. Mede entre 12KHz e 25 KHz.

O aparelho VLF-Rmf 12/240 mede frequências entre 12KHz e 240 KHz.

O aparelho VLF-EM mede a componente em fase (*inphase*) e em quadratura (*outphase*).

4.4.8. Casos teóricos

A forma da anomalia depende da geometria do condutor. Podem-se assim distinguir diversas situações:

- caso de um filão vertical, vd. Figura 4-5;

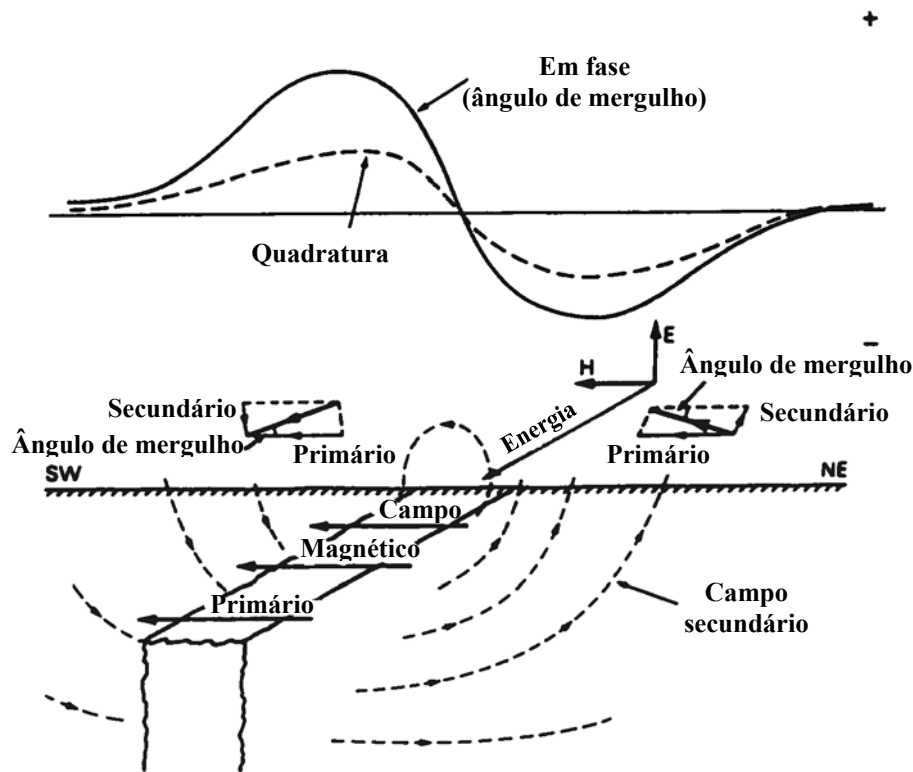


Figura 4-5 – Anomalia do componente magnético sobre um condutor vertical disposto na direcção do transmissor (segundo *Milsom, 1989*).

- caso de um filão condutor, influência da profundidade a que se encontra, influência da direcção de projecção;
- caso de uma zona de falha;
- caso de um contacto estratigráfico aproximadamente vertical (Figura 4-6);

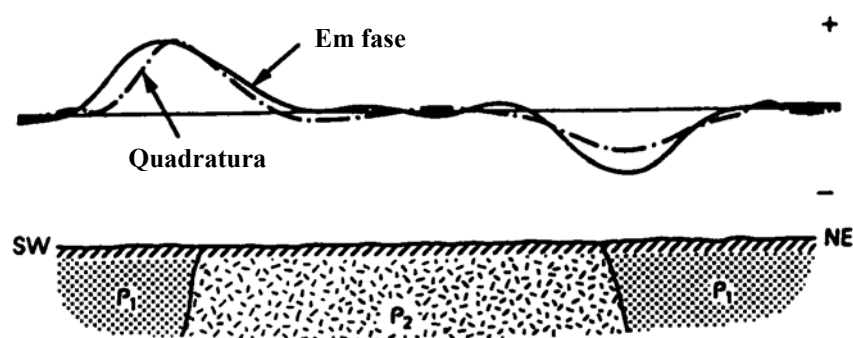


Figura 4-6 – Anomalia do campo magnético nos limites de um condutor (segundo *Milsom, 1989*).

4.4.9. VLF-Resistividade

Com o VLF clássico é possível realizar rastros e medidas pluridireccionais permitindo definir, segundo os casos, a estratigrafia, a anisotropia e a heterogeneidade do subsolo. Com o VLF-R multifrequência 12-240 KHz, é também possível realizar séries de sondagens de frequência.

O VLF-Resistividade permite medir a resistividade do subsolo, bem como o desfasamento entre a componente eléctrica, E_x e a magnética, H_y , do sinal.

Se o VLF-R for multifrequência (12-240 KHz) é possível realizar sondagens de frequência. Isto significa que, em lugar de medir apenas a banda VLF, é possível medir a frequências mais elevadas, mantendo a geometria do dispositivo inalterada. Este facto permite obter uma melhor resolução das estruturas geológicas em função da profundidade (Figura 4-7).

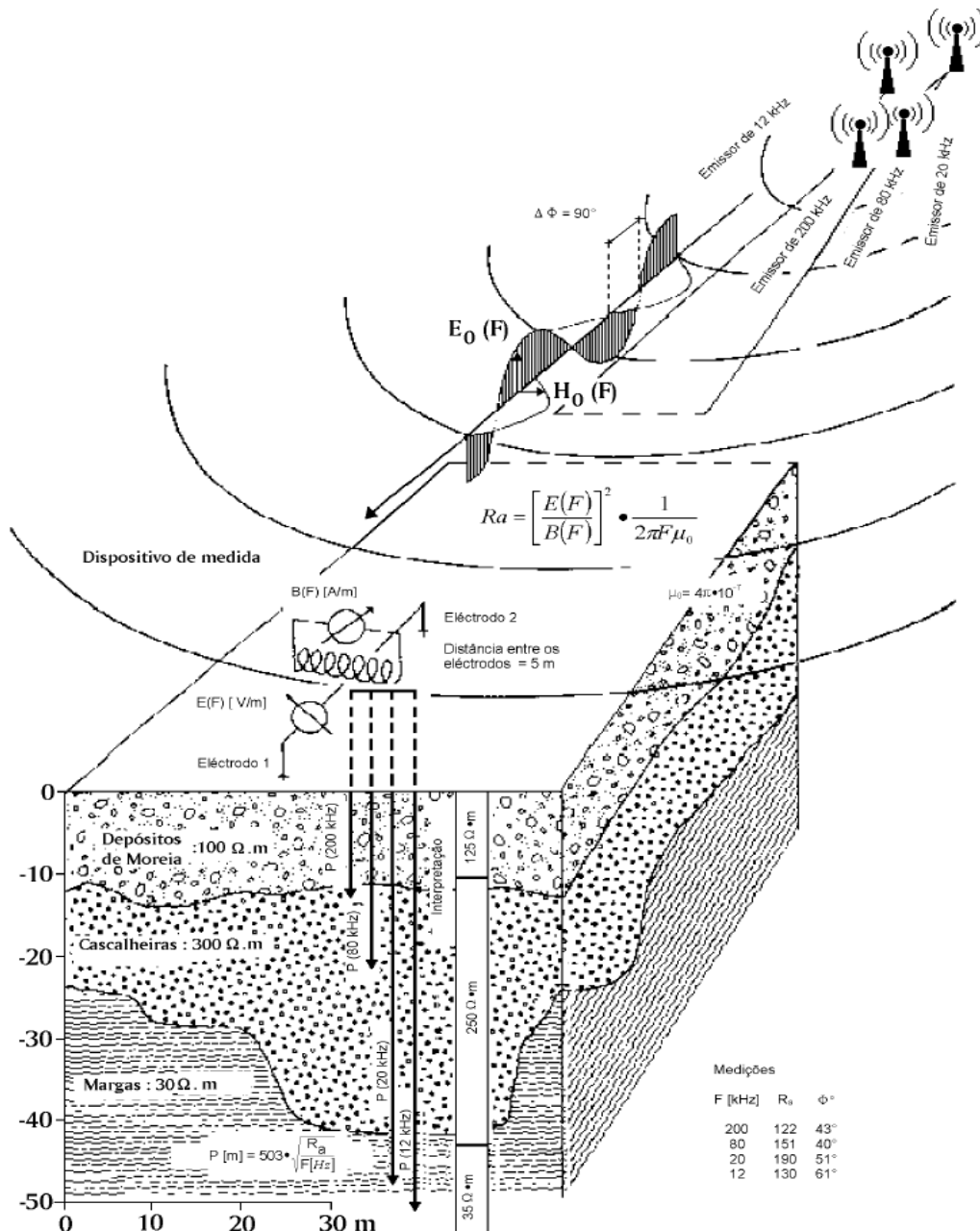


Figura 4-7 – Descrição do método electromagnético VLF multifrequência 12-240 KHz (adaptado de *Thierrin & Müller, 1988*).

4.4.9.1. Metodologia

Na estação de medida, um emissor VLF é escolhido em função da direcção do perfil a efectuar. Os dois eléctrodos são colocados no solo, de tal forma que a recta que os une esteja dirigida na direcção do emissor. A bobina é então orientada de modo a que o seu eixo esteja horizontal e perpendicular à direcção do emissor. Efectuamos a medição procurando, manual ou automaticamente, o sinal VLF mínimo. Quando este mínimo é atingido, a resistividade e o desfasamento podem ser directamente lidos ou registados.

4.4.9.2. Resistividade

O campo eléctrico segundo a direcção de propagação x , E_x , é medido entre dois eléctrodos colocados no solo. Conhecendo o campo magnético, H_y , é possível calcular a resistividade aparente, ρ_a , através da fórmula seguinte:

$$\rho_a = \left(\frac{E_x}{H_y} \right)^2 \cdot \frac{1}{2\pi f \mu_0} \quad [\Omega \cdot m] \quad (\text{Eq. 4-7})$$

com

campo eléctrico, E_x , entre dois eléctrodos em $V \cdot m^{-1}$;

excitação magnética, H_y , medida na bobina em $A \cdot m^{-1}$;

frequência, f , em Hz;

permeabilidade magnética do vazio, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot m^{-1}$.

ρ_a representa a resistividade global da camada de terreno cuja espessura é calculada segundo a profundidade efectiva (profundidade pelicular ou *skin depth*). A presença de variações verticais importantes de resistividade é colocada em evidência através do valor do desfasamento.

O interesse hidrogeológico desta variável reside no facto de que a resistividade verdadeira permite estimar a permeabilidade em zona saturada, desde que seja conhecida, para uma região dada, a relação empírica local entre resistividade verdadeira e permeabilidade.

4.4.9.3. Desfasamento

A medida do desfasamento permite avaliar o contexto estratigráfico do local. O desfasamento oscila geralmente entre 10° e 80° . Utilizam-se, na prática, as três seguintes regras:

- fase = 45° , o terreno sondado pode considerar-se homogéneo, ou seja, pode considerar-se como composto de rochas de resistividade uniforme;
- fase < 45° , o terreno sondado é constituído por uma camada menos condutora sobreposta a uma camada mais condutora. Quanto mais pequena é a fase, mais forte é o contraste de resistividade;
- fase > 45° , o terreno sondado é constituído por uma camada mais condutora que se sobrepõe a uma camada menos condutora. Quanto maior é a fase, mais forte é o contraste de resistividade;

O traçado de cartas de resistividade aparente e de desfasamento é igualmente necessário com vista a obter uma abordagem bidimensional (xy) do local estudado.

Podem obter-se resultados quantitativos por modelação matemática, sendo a interpretação magnetotelúrica normalmente feita em 1D ou 2D.

4.4.9.4. Interesse hidrogeológico das medidas

A utilização do VLF em modo estratigráfico permite uma cartografia rápida de qualquer variação geológica, cujos termos sejam, em termos eléctricos, suficientemente contrastados. Podem ser zonas de areias grosseiras em aluviões mais finos, o adelgaçamento de uma camada superficial, ou a alteração de contexto estratigráfico, entre diversos exemplos que poderiam mencionar-se. É suposto que estas variações litológicas (heterogeneidade do meio) permitam prever o comportamento dos escoamentos subterrâneos.

4.4.9.5. O modo direccional

O modo direccional é um modo de medida aplicado aos meios heterogéneos e anisótropos, por exemplo aos granitos fissurados ou às rochas calcárias carsificadas. Esta restrição advém do facto de que nos meios muito heterogéneos e anisótropos, os valores electromagnéticos medidos, dependem fortemente da configuração existente entre o emissor, o dispositivo de medida e a estrutura geológica.

É, pois, possível efectuar medidas que nos dão informação não apenas sobre a presença de estruturas condutoras, mas igualmente sobre a sua direcção.

As medições incidem, tal como anteriormente, sobre a resistividade e sobre o desfasamento entre E_x e H_y .

4.4.9.6. Metodologia

A metodologia consiste na medição, num mesmo ponto, das diferentes direcções. Esta exigência implica o recurso a várias estações VLF, de diferentes proveniências. Se medirmos em três direcções, obteremos para cada ponto de medida três resistividades e três desfasamentos.

Se num local pudermos utilizar dois emissores cujas direcções de propagação sejam perpendiculares entre si, e se uma destas direcções for paralela às estruturas geológicas e a outra perpendicular, então as condições de aplicação do método são consideradas óptimas.

4.4.9.7. Resistividade

A resistividade é medida como anteriormente, mas é deformada pelos efeitos de polarização devidos à heterogeneidade do meio. Para uma estrutura condutora englobada numa matriz resistente, os efeitos teóricos de polarização são os seguintes:

- se o dispositivo VLF é paralelo à estrutura condutora, a medida diz-se em *polarização E* (eléctrica). Neste caso, a resistividade aparente diminui ligeiramente.
- se o dispositivo VLF é perpendicular à estrutura condutora, a medida diz-se em *polarização H* (magnética). Neste caso, a resistividade aparente cai fortemente.

No caso onde temos uma estrutura resistente englobada numa matriz condutora, o comportamento da resistividade será inverso. A procura da direcção de um condutor faz-se procurando a direcção onde se mede a maior resistividade aparente. A procura da direcção

perpendicular a um condutor, faz-se procurando a direcção onde se mede a menor resistividade aparente.

4.4.9.8. Desfasamento

O desfasamento é também influenciado pela heterogeneidade do meio. Em *polarização E* o desfasamento diminui, enquanto que em *polarização H* o desfasamento aumenta.

A procura da direcção de um condutor faz-se procurando a direcção onde se mede a menor fase. A procura da direcção perpendicular a um condutor, faz-se procurando a direcção onde se mede a maior fase.

4.4.9.9. Tratamento dos dados

O tratamento de base é a realização de perfis que permitirão representar o grau de anisotropia dos terrenos. Serão comparados:

- Perfis de desfasamento em diferentes polarizações (segundo direcções escolhidas);
- Perfis de resistividade em diferentes polarizações (segundo direcções escolhidas);
- Perfil de desfasamento e de resistividade numa mesma polarização.

A interpretação quantitativa em 1D é localmente impossível devido às perturbações geradas pelos efeitos de polarização. É possível estimar qualitativamente a heterogeneidade do terreno e a sua anisotropia geofísica.

Para a heterogeneidade, utilizam-se cartas interpoladas (por krigagem com variograma) de resistividade aparente e de desfasamento. Estas cartas dão informação acerca da distribuição espacial das anomalias e das suas orientações.

Para a anisotropia geofísica podem utilizar-se cartas direccionais, onde apenas se representam os mínimos ou máximos medidos nas estações pluridireccionais.

4.4.9.10. Interesse das medidas

Em meio heterogéneo, as medidas permitem

- cartografar as zonas onde a anisotropia geofísica e a heterogeneidade local são máximas, as quais são consideradas zonas potencialmente interessantes em Hidrogeologia;
- construir um modelo estrutural bi- ou tridimensional;
- implantar sondagens com precisão, atendendo à sensibilidade deste método às variações de resistividade do meio.

4.5. Sondagens Eléctricas Verticais (SEV's)

4.5.1. Princípios do método

A prospecção eléctrica reveste diversas formas. No sentido de estudar as descontinuidades do solo, introduz-se uma corrente eléctrica no subsolo, medindo-se em seguida, à superfície, a diferença de potencial resultante.

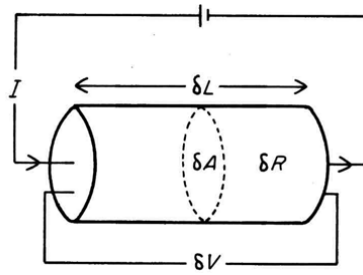


Figura 4-8 – Elemento cilíndrico atravessado por uma corrente eléctrica.

A resistividade de um material é dada por (Figura 4-8):

$$\rho = \frac{\delta R \delta A}{\delta L} \quad [\Omega \cdot m] \quad (\text{Eq. 4-8})$$

onde

resistividade do material, ρ , em $\Omega \cdot m$;
 resistência do cilindro, δR , em Ω ;
 comprimento do cilindro, δL , em m ;
 área da secção do cilindro, δA , em m^2 .

Como vimos mais atrás, a corrente, I , que atravessa o elemento cilíndrico, causa uma diferença de potencial entre as suas extremidades, δV . Como também vimos a propósito da lei de Ohm,

$$\delta V = I \delta R \quad (\text{Eq. 4-9})$$

em que

potencial, δV , em Volt;
 intensidade da corrente, I , em Ampère;

Substituindo a Eq. 4-8 na Eq. 4-9, obtém-se

$$\frac{\delta V}{\delta L} = \frac{\rho I}{\delta A} = \rho i \quad (\text{Eq. 4-10})$$

representando i a densidade de corrente, em A/m^2 , e $\delta V/\delta L$ o gradiente de potencial, em V/m .

Considerando a Figura 4-9, em que se representa um eléctrodo de corrente na superfície de um meio de resistividade uniforme, pode ver-se que o fluxo de corrente se processa de forma radial, sendo a distribuição de corrente uniforme em calotes hemisféricas a partir da fonte.

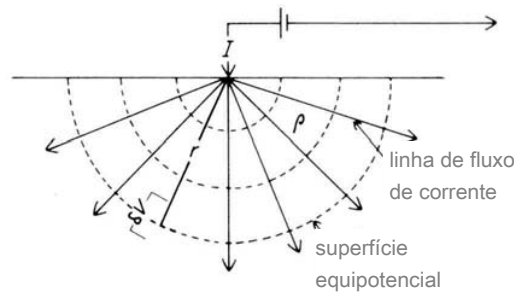


Figura 4-9 – Fluxo de corrente com origem num eléctrodo superficial.

A uma distância r do eléctrodo, a densidade de corrente, i , será dada por

$$i = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (\text{Eq. 4-11})$$

sendo a área da semi-calote esférica, a uma distância r da fonte, dada por $2\pi r^2$. Substituindo na Equação 4-10, obtém-se o gradiente de potencial associado à densidade de corrente, i

$$\frac{\delta V}{\delta r} = \rho i = \rho \frac{I}{2\pi r^2} \quad (\text{Eq. 4-12})$$

O potencial à distância r é dado por

$$V = \int_r^\infty \delta V = \int_r^\infty \frac{\rho I}{2\pi r^2} dr = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (\text{Eq. 4-13})$$

Considerando agora outro eléctrodo de corrente, nos termos dados pela Figura 4-10

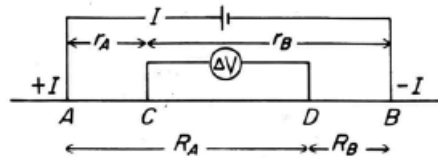


Figura 4-10 – Fluxo de corrente com origem em dois electrodos superficiais.

O potencial no eléctrodo de medição C é dado pela soma dos potenciais correspondentes aos electrodos de injeção A e B, sendo

$$V_C = V_A + V_B \quad (\text{Eq. 4-14})$$

pelo que, tendo em conta a Equação 4-13, obtemos, relativamente ao potencial medido em C,

$$V_C = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B} \right) \quad (\text{Eq. 4-15})$$

e, relativamente ao potencial medido no eléctrodo D,

$$V_D = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \quad (\text{Eq. 4-16})$$

Pelo que a diferença de potencial, ΔV , entre os eléctrodos C e D é dada pela expressão constante da Equação 4-17

$$\Delta V = V_C - V_D = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) - \left(\frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right] \quad (\text{Eq. 4-17})$$

ou, o que é o mesmo,

$$\rho = \frac{2\pi \Delta V}{I \left[\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) - \left(\frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right]} \quad (\text{Eq. 4-18})$$

Se o solo estudado não for homogéneo, o valor de resistividade que obteremos representa o conjunto de formações presentes e varia não só com a disposição relativa dos eléctrodos, mas também com as heterogeneidades presentes. O valor calculado é então designado de resistividade aparente, ρ_a , e é dado por

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} k \quad (\text{Eq. 4-19})$$

sendo k o factor geométrico do dispositivo.

O afastamento dos eléctrodos de injeção e a profundidade efectiva de pesquisa encontram-se relacionados. Genericamente, aceita-se que o afastamento entre os pontos A e B deva ser duas ou três vezes superior à profundidade de investigação para que a sondagem possa ser interpretada.

Existem diversas configurações de eléctrodos que podem utilizar-se. No presente trabalho vamos utilizar o Dispositivo de Schlumberger (Figura 4-11) um dos dispositivos normalmente empregues na realização de Sondagens Eléctricas Verticais.

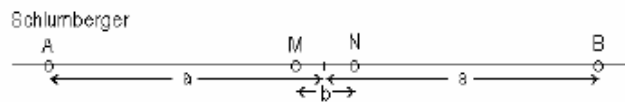


Figura 4-11 – Configuração de eléctrodos utilizada no dispositivo de Schlumberger.

O factor geométrico relativo a esta configuração é dado pela Equação 4-20, abaixo apresentada.

$$k = \frac{2\pi a^2}{b} \left(1 - \frac{b^2}{4a^2} \right) \quad \text{Dispositivo de Schlumberger} \quad (\text{Eq. 4-20})$$

4.5.2. Sondagens Eléctricas Verticais - Schlumberger

O objectivo da Sondagem Eléctrica Vertical (Schlumberger) é a discretização do solo em camadas de espessura e resistividade determinadas. A sua aplicabilidade é ideal nos casos unidimensionais (camadas estratificadas horizontais infinitas), mas pode ser igualmente aplicada em locais de geologia mais complicada, acarretando, no entanto, uma interpretação mais morosa e difícil.

O princípio de funcionamento é simples. É injectada à superfície do solo corrente eléctrica em dois pontos (A e B nas Figuras 4-11 e 4-12) fechando um circuito. Em outros dois pontos também à superfície, é efectuada a leitura da diferença de potencial eléctrico (M e N, nas mesmas Figuras) criada pela injeção da corrente.

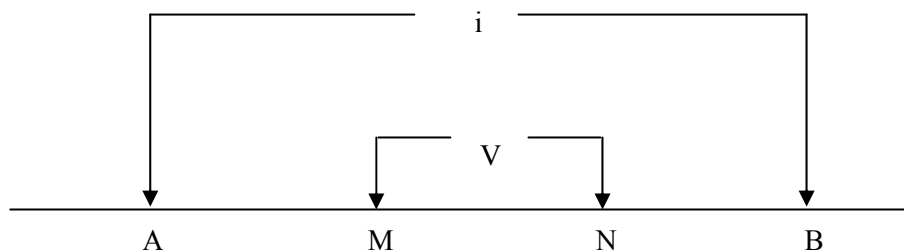


Figura 4-12 – Dispositivo de Schlumberger.

A profundidade de investigação (Figura 4-13) varia muito com a resistividade das formações atravessadas, e só após modelação e interpretação dos resultados esta fica bem determinada.

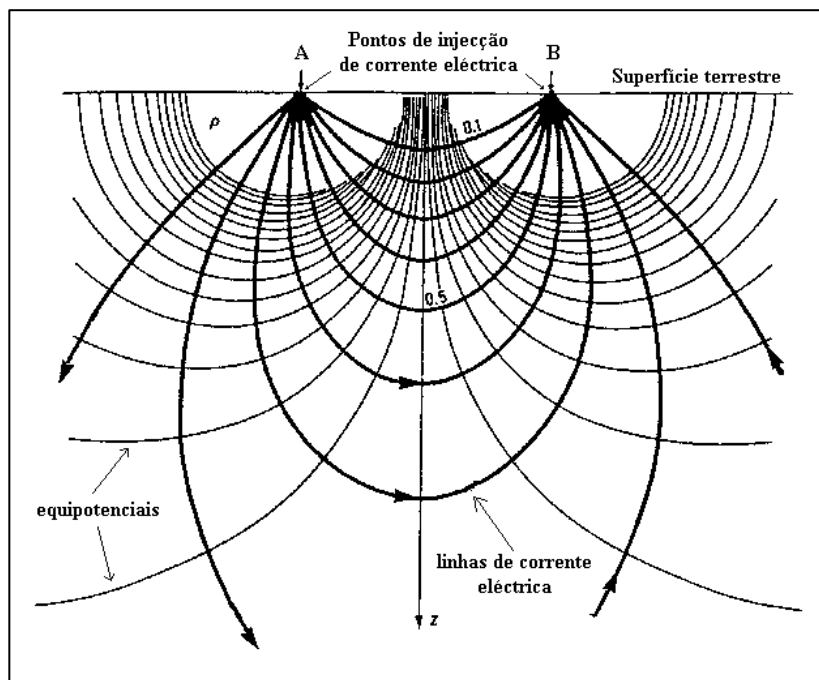


Figura 4-13 – Linhas equipotenciais e de corrente num solo homogêneo.

A representação dos resultados é normalmente feita em escala bi-logarítmica (Figura 4-14), sendo o eixo das abcissas a distância $AB/2$ e as ordenadas a resistividade aparente (curva de campo) e resistividade real (o modelo).

A modelação pode ser feita recorrendo às modernas técnicas de resolução do problema inverso, nomeadamente o uso de filtragem digital para a resolução do problema directo com a técnica do máximo gradiente descendente na resolução da inversão dos parâmetros do modelo correspondente. Estas técnicas necessitam sempre de um modelo inicial aproximado, para que a convergência para o modelo final se produza com um erro mínimo.

Esta modelação também pode ser realizada com recurso ao método dos mínimos quadrados para se fazer o ajustamento entre as resistividades de campo e as obtidas a partir de um modelo arbitrado “*a priori*”. A análise da resolução dos parâmetros dos modelos calculados, pode ser feita determinando o denominado “parâmetro de resolução” e ainda pela análise da matriz de covariância dos parâmetros calculados.

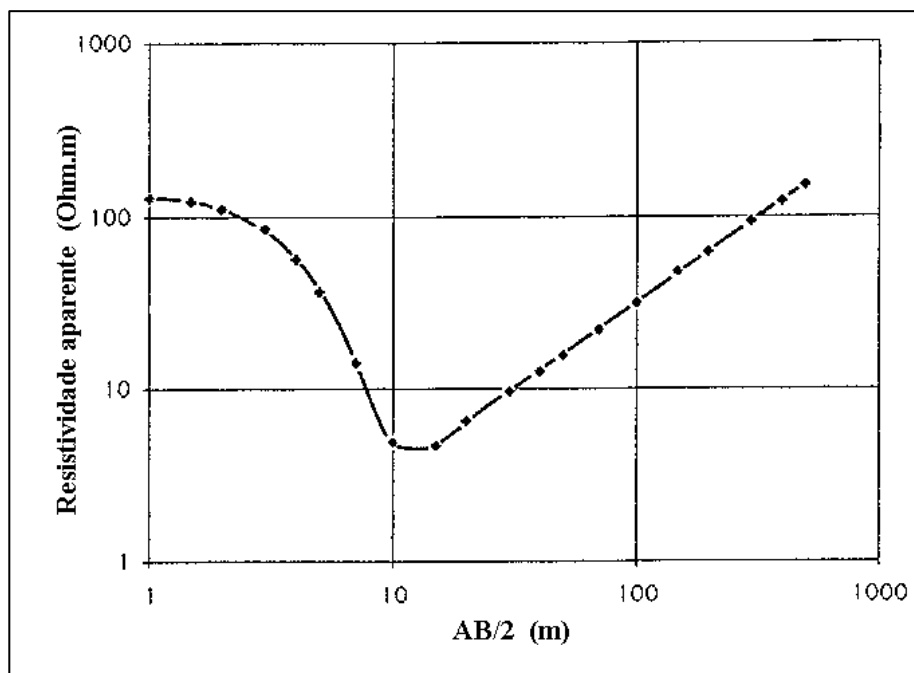


Figura 4-14 – Gráfico bi-logarítmico de resistividade aparente vs. distância.

5. Prospekção Geofísica Efectuada na Vizinhança da Área Mineira de Castelejo

5.1. Emprego do método VLF-EM

É comum depararmo-nos com problemas de diversa ordem, ao abordar o estudo hidrogeológico de aquíferos fracturados, com vista à sua caracterização hidráulica.

Particularmente no caso das rochas graníticas, as quais, quando sãs, são praticamente impermeáveis, é sabido que a circulação fissural pode muitas vezes desempenhar papel determinante.

A circulação da água neste tipo de rochas coloca desde logo uma questão fundamental, que se prende com a identificação das fracturas por onde o escoamento é susceptível de se processar: estas nem sempre são facilmente identificáveis, atendendo à espessura da camada de cobertura que por vezes sobrejáz à rocha.

Verifica-se assim a necessidade de recorrer a métodos indirectos de prospekção, cujos resultados permitam identificar eventuais anomalias de interesse hidrogeológico.

O método ora utilizado é um método geofísico electromagnético (VLF-EM) desenvolvido no Centro de Hidrogeologia da Universidade de Neuchâtel, Suíça, que se baseia nas ondas de rádio de baixa a muito baixa frequência – de 12 kHz a 300 kHz - emitidas por antenas existentes em todo o Globo. Estas ondas também se propagam no subsolo, sendo a profundidade de penetração do campo primário por elas gerado dada por (recorde-se a Eq. 4-6):

$$P = 503 \sqrt{\frac{\rho_a}{F}}$$

sendo:

P - profundidade de penetração do campo primário gerado pelas ondas de rádio (m);

ρ_a - resistividade aparente (ohm.m);

F - frequência das ondas (Hz);

Por outro lado, tais ondas dão igualmente origem a um campo electromagnético secundário, dependente da natureza do material atravessado e susceptível de detecção superficial. Nestes termos, o campo total resulta da soma dos campos primário e secundário, que se distinguem tanto em intensidade, como em fase e direcção.

5.1.1. Descrição

Como acima foi referido, o método utilizado ora em apreço é o método Very Low Frequency – Electromagnetic (VLF-EM). Através da utilização de aparelhos de medida especialmente adaptados, o que assume carácter preponderante em termos hidrogeológicos, é possível, por intermédio de uma bobine de eixo horizontal, medir a intensidade do campo magnético primário (H_p), sendo a intensidade do campo magnético secundário (H_s), medida com recurso a uma outra bobine, esta de eixo vertical.

A aparelhagem utilizada foi especificamente desenvolvida para fins hidrogeológicos pelo Professor Imre Müller, do Centro de Hidrogeologia da Universidade de Neuchâtel, Suíça. Difere dos aparelhos comerciais por registar continuamente a variação do sinal. A utilização conjunta de um Data-Logger e um GPS assegura a localização exacta das anomalias registadas.

As componentes verticais encontram-se em fase (inphase) ou em quadratura (outphase) relativamente ao campo primário.

A expressão dos resultados é dada pela relação H_s/H_p %, como se ilustra na Figura 4-1.

O método permite detectar a presença de corpos condutores eléctricos, como sejam, por exemplo, falhas preenchidas por materiais argilosos, apresentando igualmente grande sensibilidade a outras importantes características geológicas, tais como variações laterais de fácies.

O método apresenta ainda a vantagem de não exigir contacto com o solo, podendo instalar-se em viaturas automóveis (Figura 5-1) ou empregar-se manualmente.



Figura 5-1 – Método VLF-EM: instalação em viatura automóvel (Mina do Castelejo).

5.1.2. Resultados obtidos

Apresenta-se na Figura 5-2 a planta fotográfica dos locais em que foi efectuada prospecção geofísica pelo método VLF-EM, acima descrito.

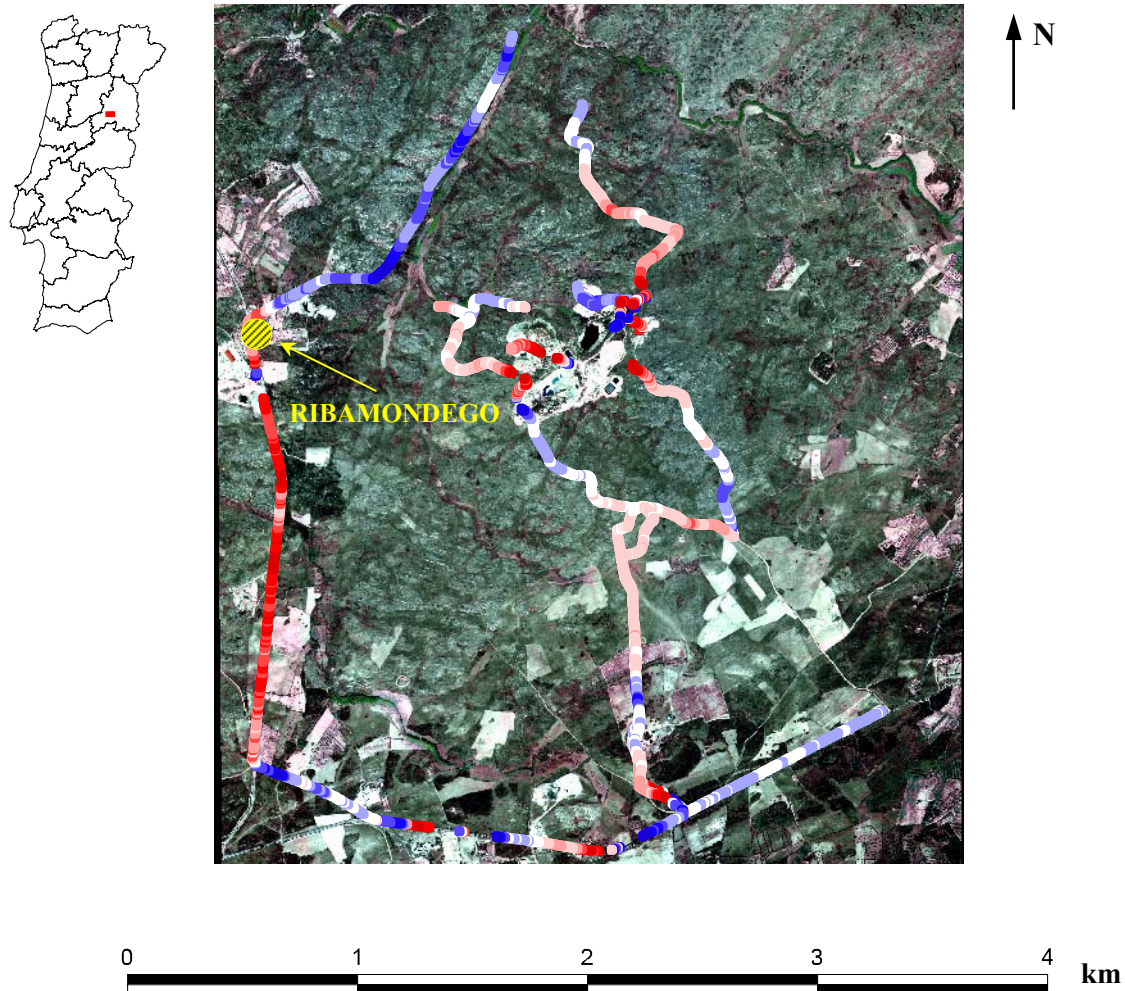


Figura 5-2 – Planta fotográfica do local onde foi efectuada prospecção VLF-EM.

Os locais assinalados indicam os caminhos percorridos, enquanto que a gradação de cores indica que a relação $H_s/H_p\%$ é:

cor encarnada – relação $H_s/H_p\%$ positiva;

cor azul – relação $H_s/H_p\%$ negativa;

cor branca - relação $H_s/H_p\%$ próxima de zero;

Apresenta-se na Figura 5-3 o percurso traçado em cada um dos perfis efectuados. Na totalidade, foram percorridos 17742,17 m, distribuídos da seguinte forma:

Perfil 1 - 1590,028 m;

Perfil 2 - 1456,71 m;

Perfil 3 - 2031,99 m;

Perfil 4 - 2282,65 m;

Perfil 5 - 692,69 m;

Perfil 6 - 7620,00 m;

Perfil 7 - 2068,049 m;

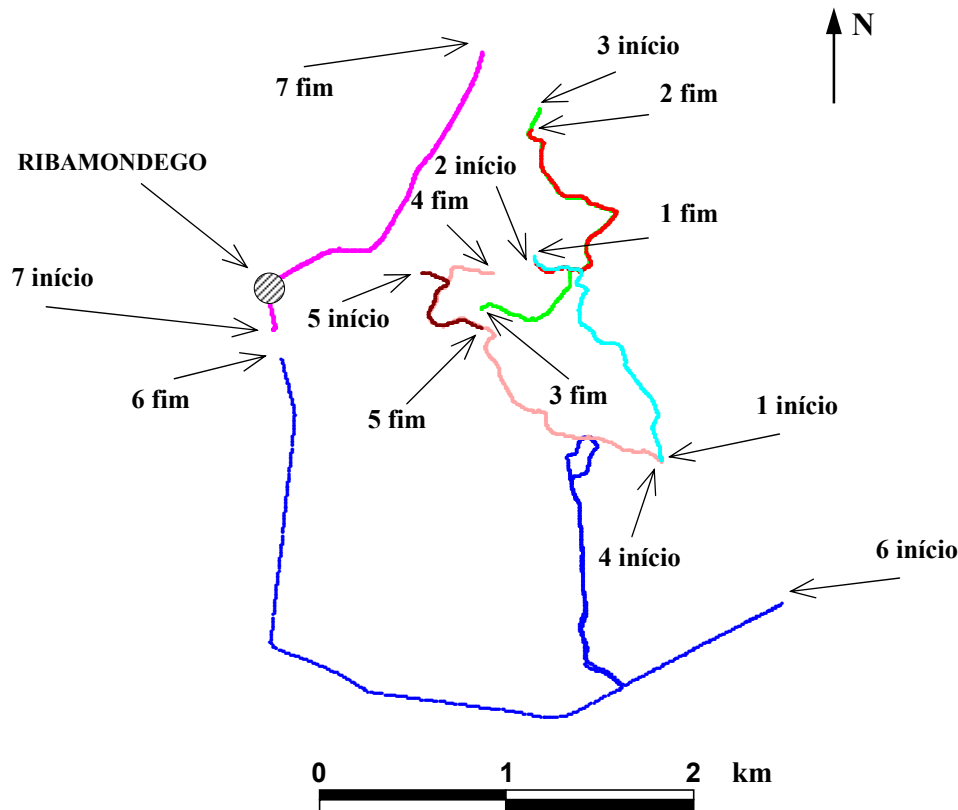


Figura 5-3 – Trajectos percorridos na prospecção, indicando-se o início e fim de cada perfil.

De notar a sobreposição existente entre alguns troços, permitindo confirmar os registos anteriormente obtidos.

Todos os perfis foram realizados à frequência de 16 kHz. Da sua interpretação (*Dill et al., 1998*) podem retirar-se algumas importantes conclusões.

Os valores muito negativos, ou muito positivos ($H_s/H_p < -40\%$ ou $H_s/H_p > 40\%$) correspondem a medições efectuadas sob influência de linhas eléctricas de alta tensão, pelo que não devem ser considerados.

Valores de $H_s/H_p\%$ negativos correspondem, em regra, a terrenos de maior resistividade eléctrica, enquanto que valores de $H_s/H_p\%$ positivos indicam maior condutividade eléctrica (por exemplo, presença de materiais argilosos).

Inflexões sucessivas de $H_s/H_p\%$ indicam zonas de fracturação, tanto mais importantes, quanto maior a amplitude registada.

Apresenta-se em seguida uma interpretação sumária dos resultados obtidos (Figura 5-4).

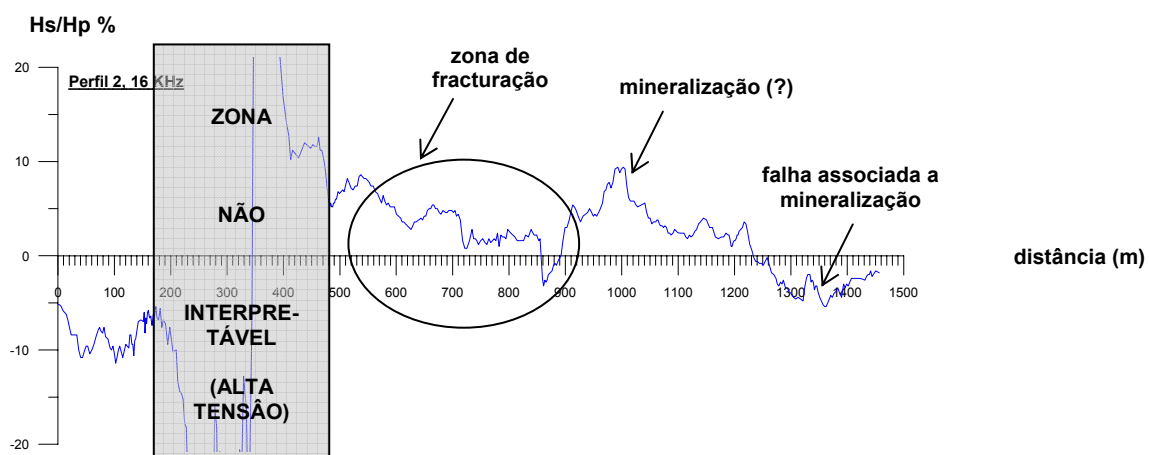
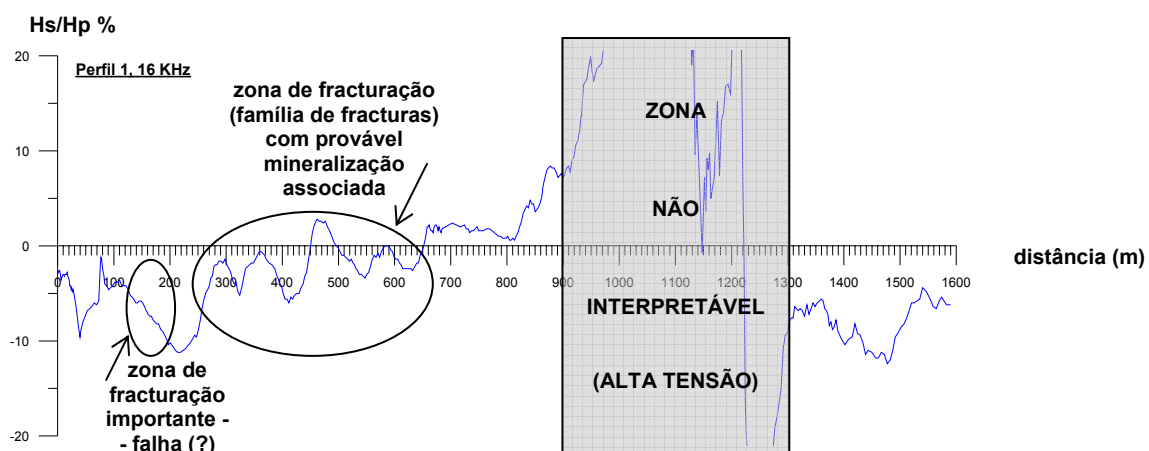


Figura 5-4 – Interpretação dos resultados obtidos através dos perfis efectuados na prospecção – perfis 1 e 2 (continua).

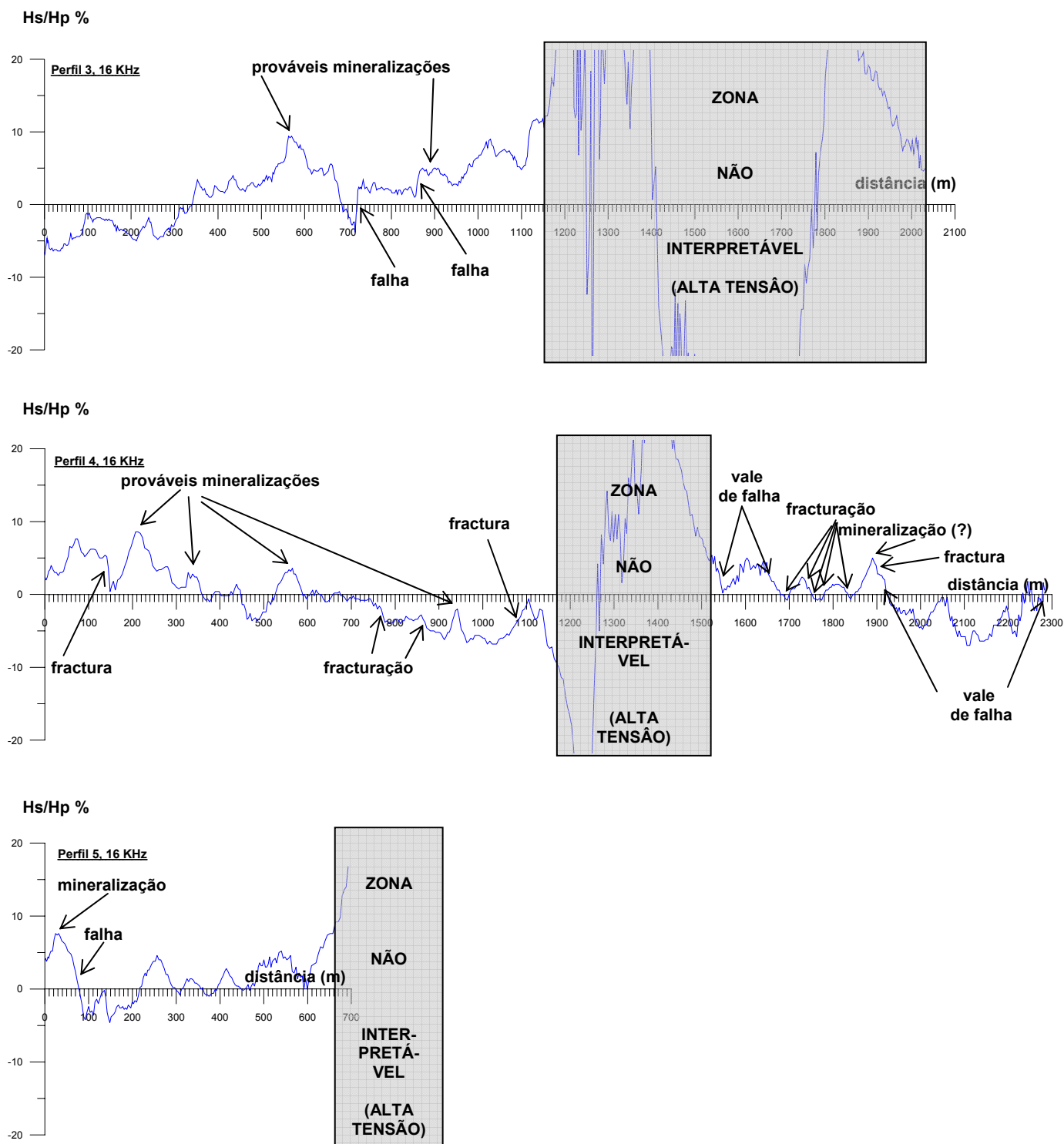


Figura 5-4 (continuação) – Interpretação dos resultados obtidos através dos perfis efectuados na prospecção – perfis 3, 4 e 5 (continua).

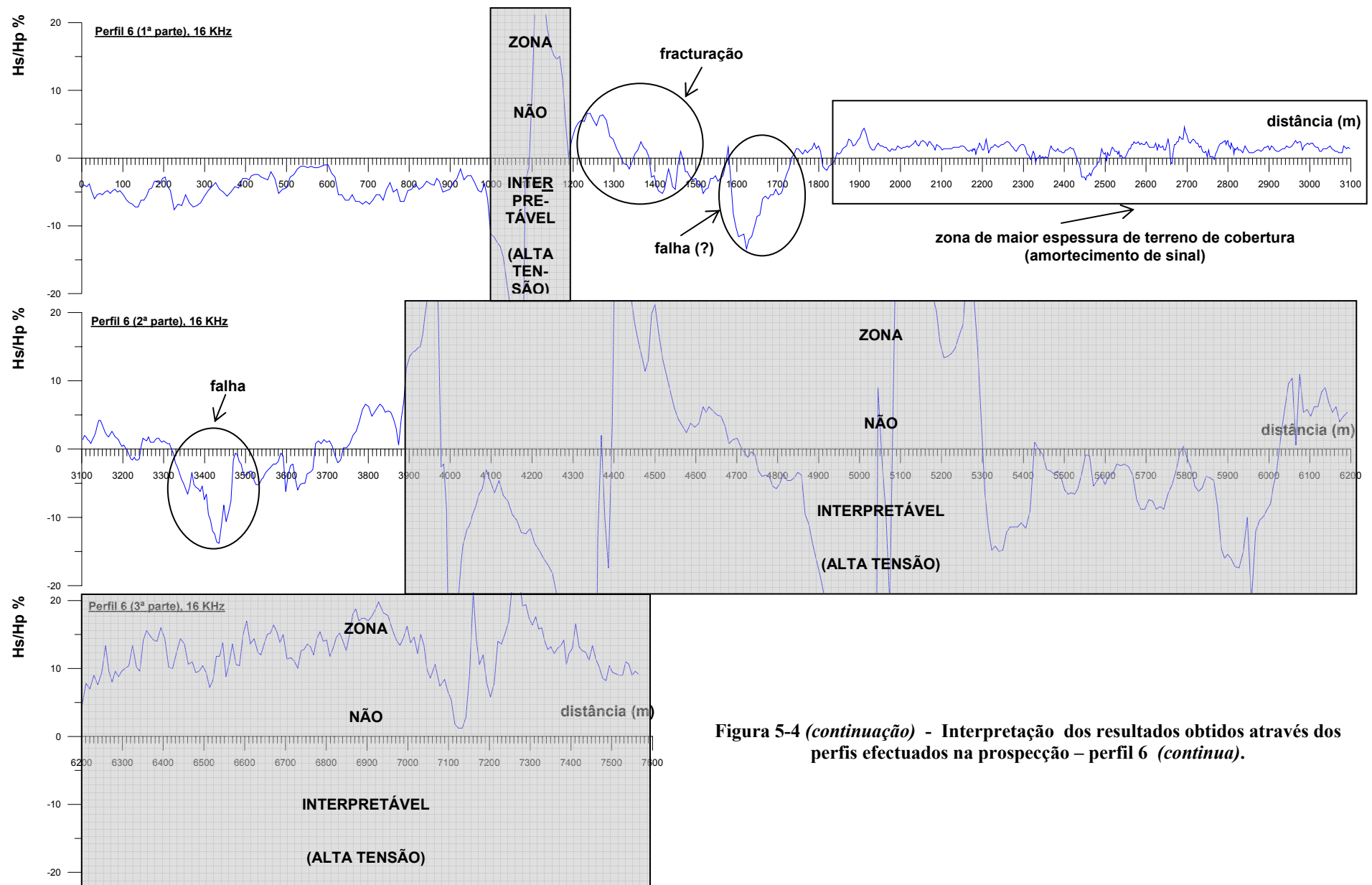


Figura 5-4 (continuação) - Interpretação dos resultados obtidos através dos perfis efectuados na prospecção – perfil 6 (continua).

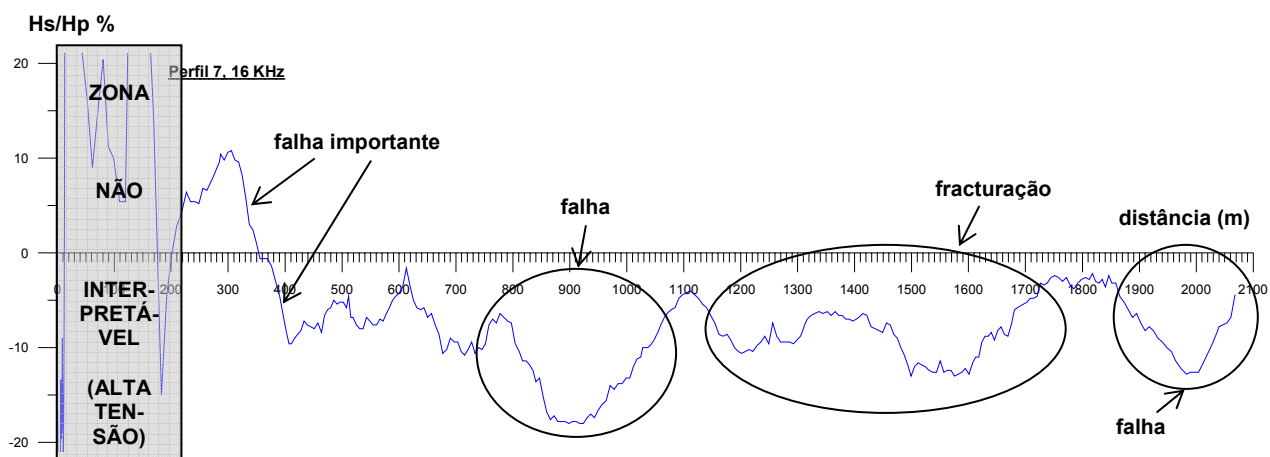


Figura 5-4 (continuação) – Interpretação dos resultados obtidos através dos perfis efectuados na prospecção – perfil 7 .

De referir que, designadamente neste último perfil, as falhas assinaladas foram observadas “*in situ*”.

A interpretação dos perfis atrás indicados, cruzada com diversa informação de campo – v.g., presença de água à superfície - permitiu elaborar uma carta sumária de fracturação da zona em estudo, que se apresenta na Figura 5-5.

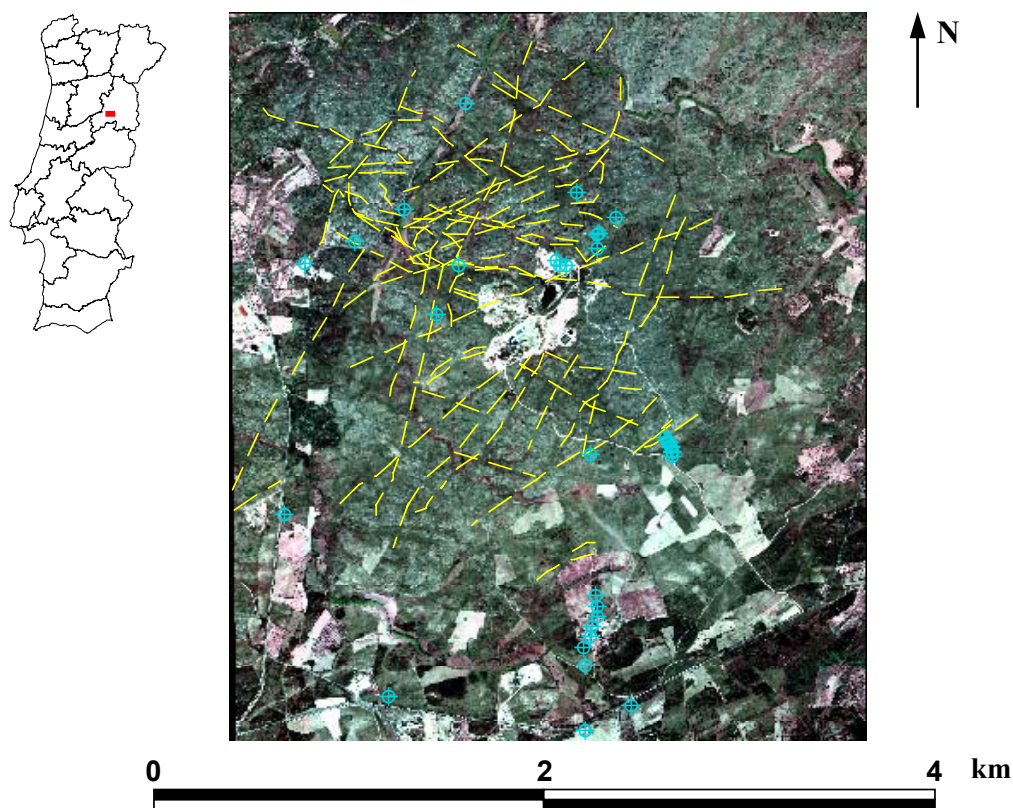


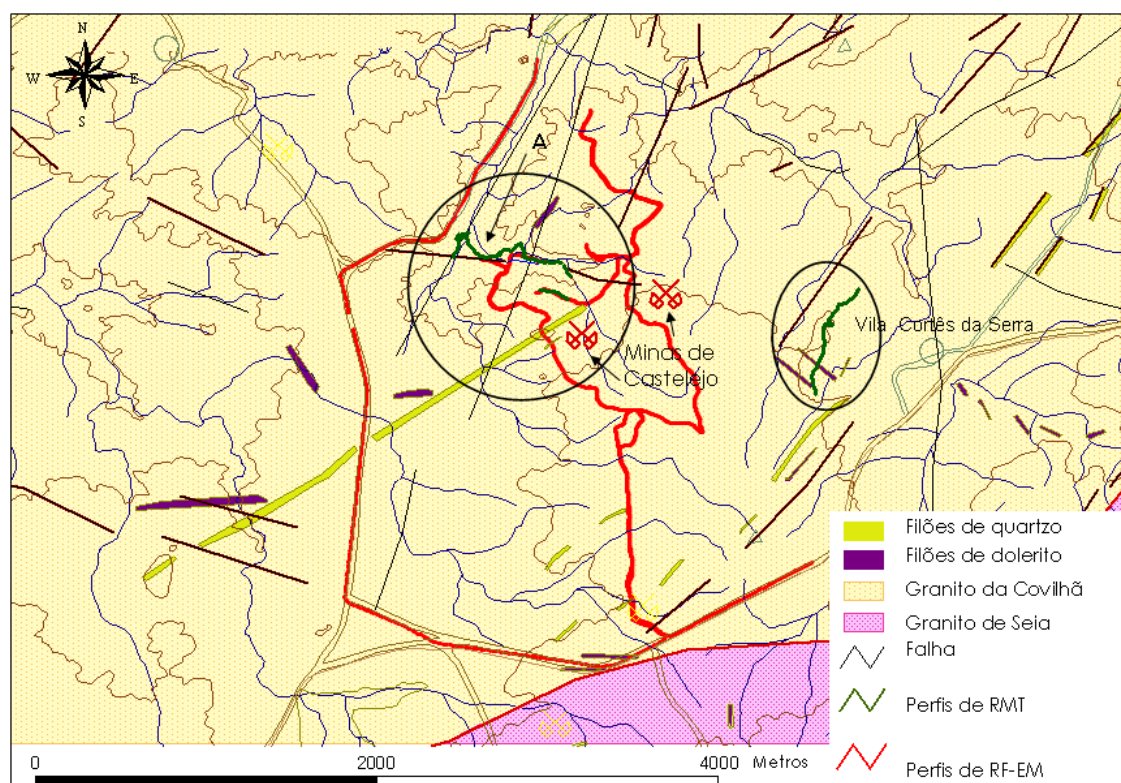
Figura 5-5 – Carta sumária de fracturação da zona em estudo.
(Fracturas - amarelo; locais em que foi assinalada a presença de água - azul).

5.2. Emprego do método VLF-R

5.2.1. Descrição

Tanto a prospecção geofísica anteriormente realizada (Figura 5-6, Perfis de RF-EM) como a bibliografia consultada (Ponte, 1992) alertavam para a presença de falhas e de fracturação que poderiam constituir caminhos preferenciais de escoamento superficial e subterrâneo.

No caso concreto, foram efectuadas medições de RMT (Figura 5-6, Perfis de RMT) a WNW da área mineira. Mediram-se as resistividades aparentes e a desfasamento entre o campo eléctrico e o magnético. Os valores obtidos foram projectados em ArcView e tratados graficamente. Utilizou-se ainda um programa de Inversão (FitVLF2) para a obtenção dos valores de resistividade reais e das espessuras.



**Figura 5-6 - Extracto da carta geológica com implantação dos perfis efectuados
- RF-EM (vermelho) e RMT-R (verde);
(cartografia geológica cedida pelo Departamento de Geologia do INETI, S. Mamede de Infesta).**

5.2.2. Resultados

Os trabalhos efectuados no sector a WNW assinalado com a letra A (Figura 5-6) vieram a ser bastante elucidativos. Foi efectuado um perfil ao longo do vale de falha com a mesma direcção (Figura 5-7, sector A) já detectada pela prospecção com RF-EM (gráfico em azul). É muito interessante comparar os resultados da geofísica com a fracturação e lineações existentes na zona (Figura 5-7). Com efeito, foram encontradas situações de polarização do sinal (pol-E e pol-H), consoante a direcção da execução do perfil em relação a essas estruturas.

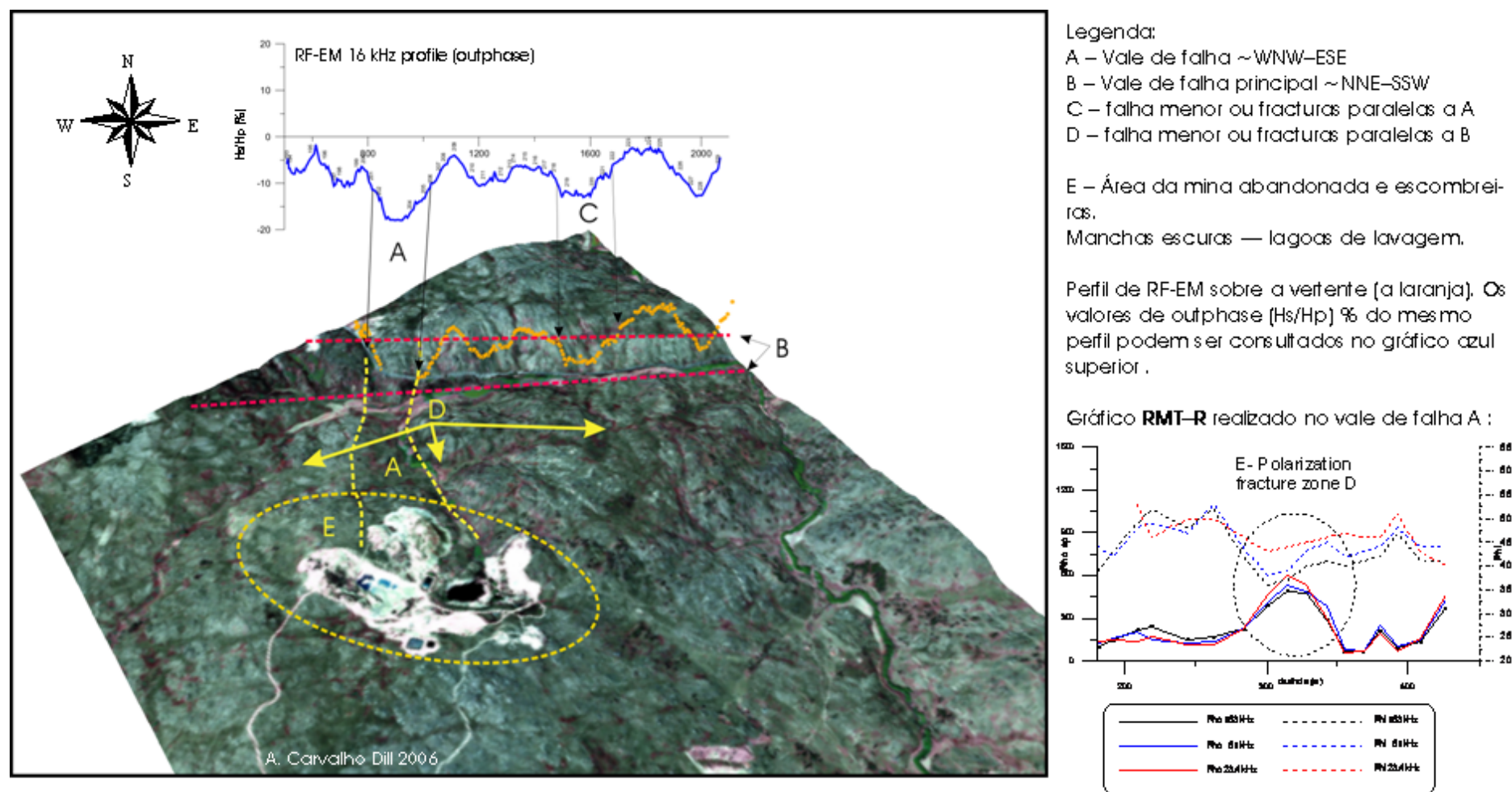


Figura 5-7 - Estruturas geológicas principais detectadas (falhas conjugadas e fracturas) pela aplicação dos métodos electromagnéticos (RF-EM e RMT-R). A polarização E detectada através do método RMT-R é causada pela fractura D (fotografia aérea © Google 2006).

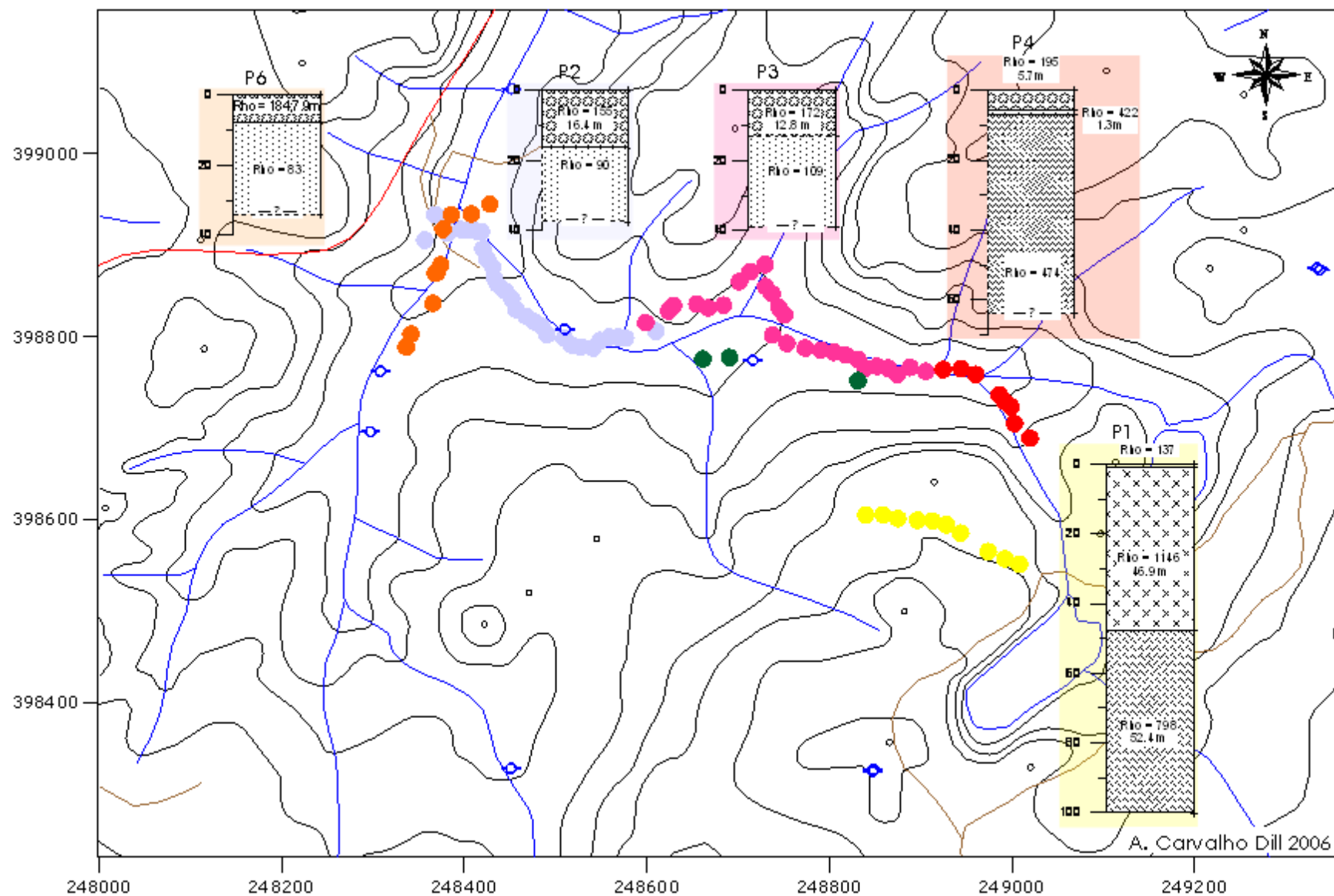
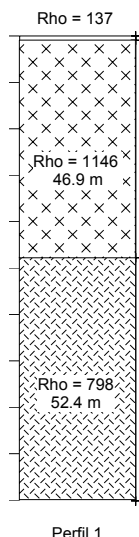


Figura 5-8 - Logs de resistividade sectoriais, ilustrando o aumento da espessura da camada superior (o qual é acompanhado por uma diminuição do tamanho de grão para jusante - ver perfis 4, 3 e 2).

A Figura 5-7 mostra igualmente a fotografia aérea em projecção 3D e exemplifica uma situação de polarização E (com aumento dos valores de resistividade e diminuição da fase) obtida ao atravessar uma fractura de direcção NNE-SSW. O perfil foi efectuado perpendicularmente a esta.

Retiradas as situações de polarização E e H, procedeu-se ao cálculo das resistividades reais e das espessuras das diferentes camadas. De seguida calcularam-se valores médios sectoriais (Figura 5-8).



O perfil P1 (pontos amarelos) localiza-se perto da exploração da mina: os valores correspondem aos obtidos numa situação de blocos de granito pouco alterados (valores de resistividade $> 1000 \Omega \cdot m$) imersos numa matriz aparentemente mais alterada (?) (resistividade $\approx 700 \Omega \cdot m$).

Os perfis, realizados ao longo do vale do Castelejo que se estende a WNW da Lagoa de lavagem, indicam que se trata de um vale de falha, preenchido por material proveniente da erosão. Deste modo e para fins de modelação do escoamento e do transporte de contaminantes, a utilização de um modelo que considere o meio como poroso parece ser compatível com os resultados obtidos.

Todos os perfis revelam ainda uma situação singular – os valores de resistividade diminuem em profundidade.

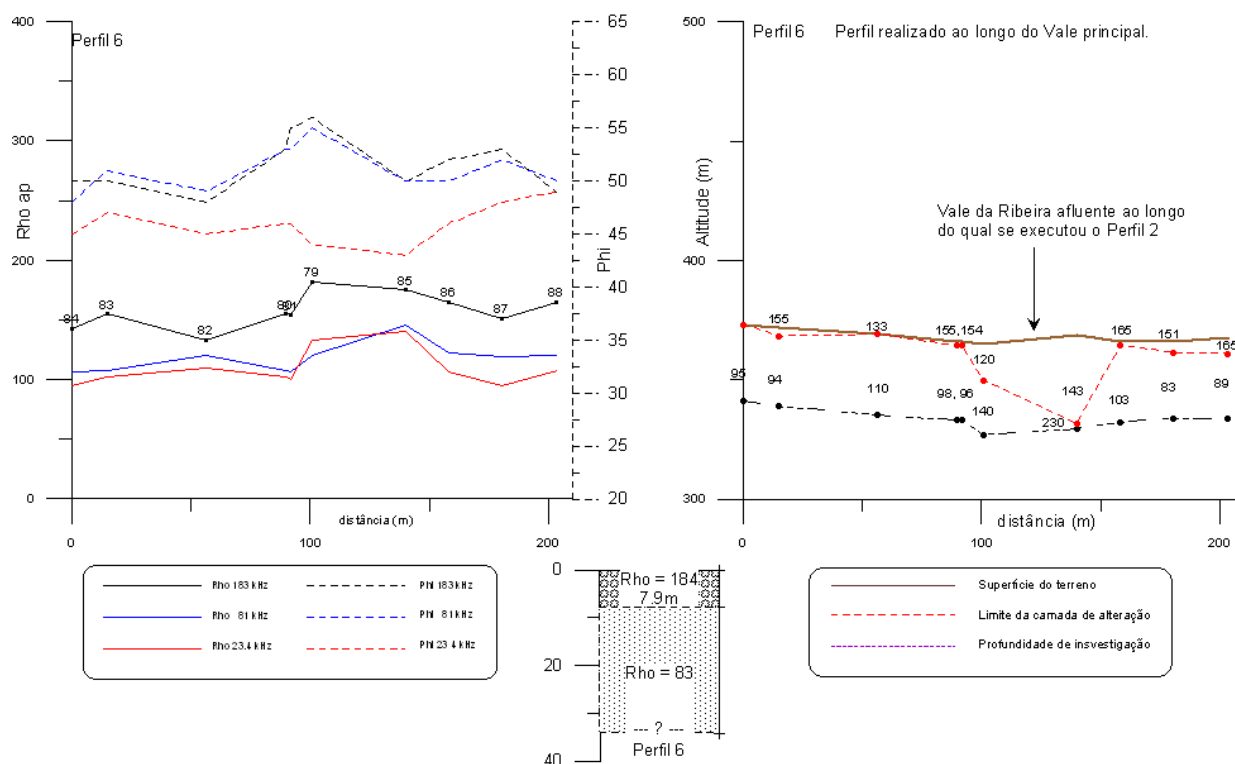


Figura 5-9 - Perfil 6 realizado ao longo do vale de falha principal - direcção NNE-SSW (vide Fig. 5-7, sector B). De notar a quase inexistência da camada superior e a confluência da Ribeira WNW-ESE (vide Fig. 5-7, sector A).

Tal tanto poderá dever-se a causas naturais (camadas mais alteradas), como poderá indicar uma situação de contaminação profunda com drenagem ácida (aumento da mineralização).

O Perfil 6 (sector cor de laranja) situa-se no vale da falha principal - Vale da Arinta - de direcção NNE. A menor espessura da camada superior deve-se possivelmente ao papel erosivo da ribeira (ver Figura 5-9).

5.3. Aplicação das Sondagens Eléctricas Verticais

5.3.1. Relatório da campanha

No sentido de melhor caracterizar as espessuras das camadas dos materiais presentes na mina de Castelejo, foram efectuadas cinco Sondagens Eléctricas Verticais nas imediações do perímetro mineiro.

A localização e orientação das SEV's apresenta-se na Figura 5-10.

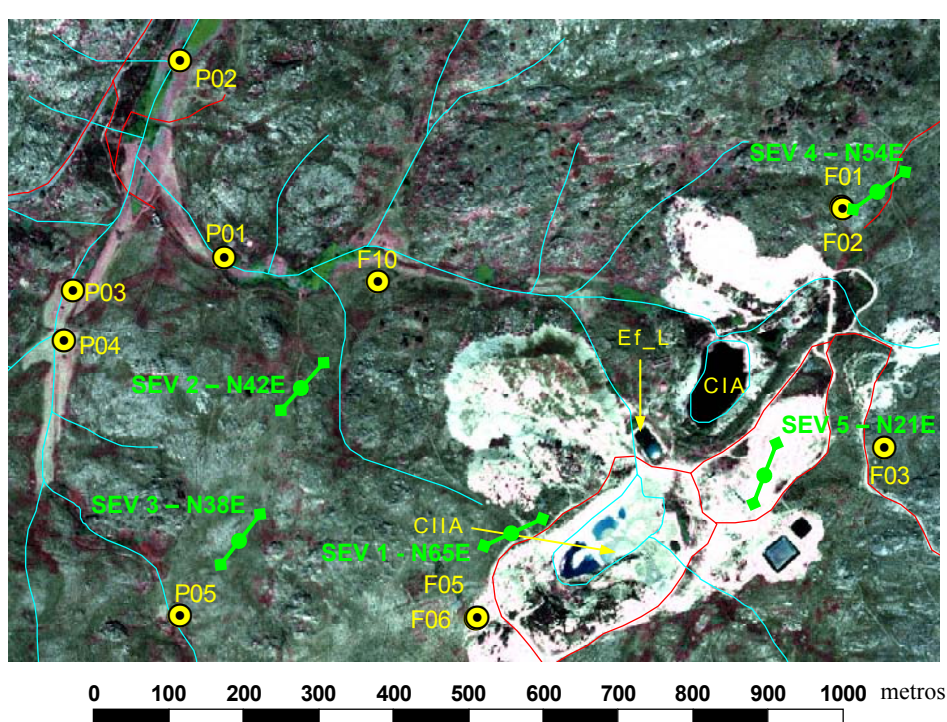


Figura 5-10 – Localização e orientação das SEV's efectuadas nas imediações da mina de Castelejo.

As sondagens efectuadas foram interpretadas de acordo com o método de Schlumberger. A incongruência dos dados recolhidos aquando da realização das campanhas não permitiu esclarecer cabalmente todas as sondagens, designadamente as sondagens 2 e 4.

Não obstante, foi feito um esforço de interpretação no sentido de integrar os dados recolhidos com a realidade de campo.

5.3.2. Resultados

Da análise dos resultados obtidos resulta que a curva do modelo tem um valor aproximado em relação aos valores obtidos no campo devido à grande irregularidade destes. Ou seja, o ajuste do modelo aplicado com a curva de campo não é muito precisa.

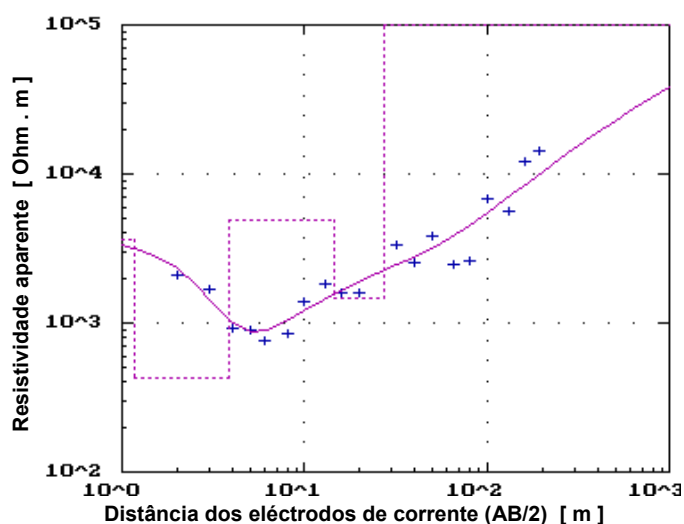


Figura 5-11 – Modelo ajustado à SEV 1.

Na Figura 5-11 representa-se o modelo obtido da inversão da sondagem eléctrica vertical 1. O erro quadrático médio (*root mean square error*, RMS) que lhe está associado é $\text{RMS} = 10\%$.

O número de camadas interpretadas a partir dos dados constantes do gráfico da Figura 5-11, bem como a sua espessura, apresentam-se na Tabela 5-1.

Camada	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)
1	3659.4	1.2
2	432.0	2.7
3	4881.2	10.5
4	1473.2	13.0
5	100000.0	-

Tabela 5-1 – Valores obtidos a partir da interpretação da SEV 1.

Já em relação à SEV 2, como os valores de campo apresentam alguma aleatoriedade (veja-se Figura 5-12), optou-se por traçar uma curva de campo que respeitasse a tendência da primeira curva. Os resultados são os apresentados na figura 5-13.

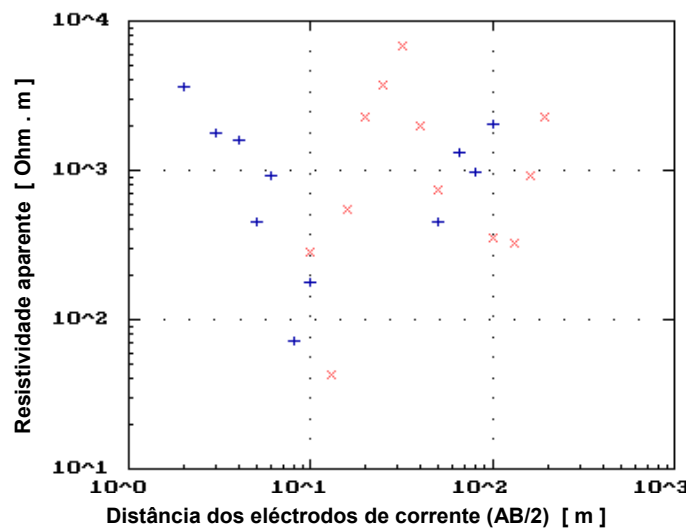


Figura 5-12 – Dados de campo da SEV 2.

Na Figura 5-13 representa-se o modelo obtido da inversão da sondagem eléctrica vertical 2. O erro quadrático médio que lhe está associado é $RMS = 2\%$.

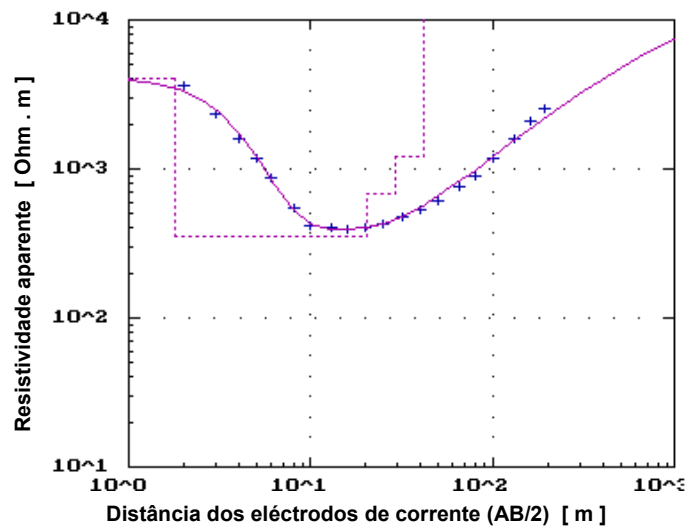


Figura 5-13 – Modelo ajustado à SEV 2.

O número de camadas interpretadas a partir dos dados constantes do gráfico da Figura 5-13, bem como a sua espessura, apresentam-se na Tabela 5-2.

Camada	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)
1	4048.4	1.8
2	351.0	18.6
3	681.2	8.9
4	1202.4	12.4
5	14977.2	-

Tabela 5-2 – Valores obtidos a partir da interpretação da SEV 2.

Como se pode verificar, a SEV 3 atravessa uma descontinuidade geológica, junto ao ponto $AB/2 = 50\text{m}$ (Figura 5-14).

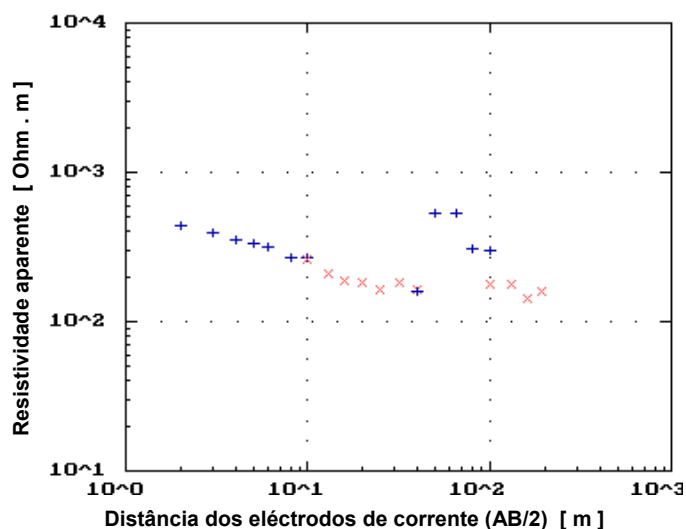


Figura 5-14 – Dados de campo da SEV 3.

Assim, fez-se a inversão apenas até ao ponto $AB/2 = 40\text{m}$, tendo-se obtido o modelo que se apresenta na Figura 5-15, o qual possui um erro quadrático médio associado de $\text{RMS} = 2\%$.

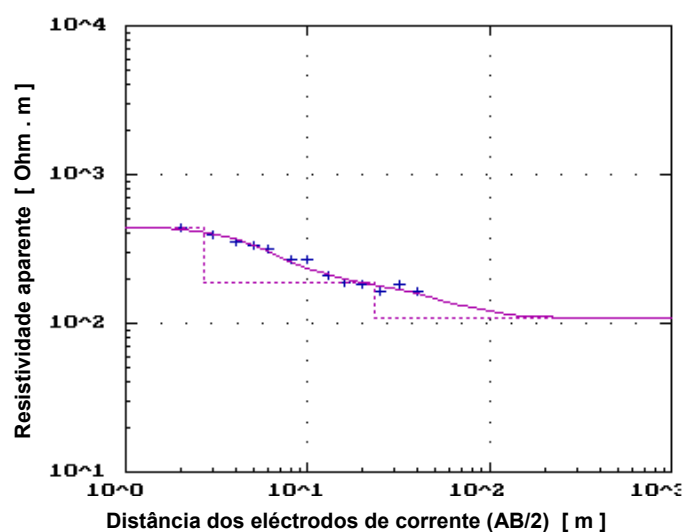


Figura 5-15 – Modelo obtido da inversão da SEV 3, sem a descontinuidade geológica.

O número de camadas interpretadas a partir dos dados constantes do gráfico da Figura 5-15, bem como a sua espessura, apresentam-se na Tabela 5-3.

Camada	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)
1	442.0	2.7
2	186.1	20.4
3	108.2	-

Tabela 5-3 – Valores obtidos a partir da interpretação da SEV 3.

Uma vez que a curva da SEV 4 apresenta um comportamento semelhante ao da SEV 2, mais uma vez optou-se por fazer uma interpretação que respeitasse a tendência da de campo. Os valores reais de campo apresentam-se na Figura 5-16.

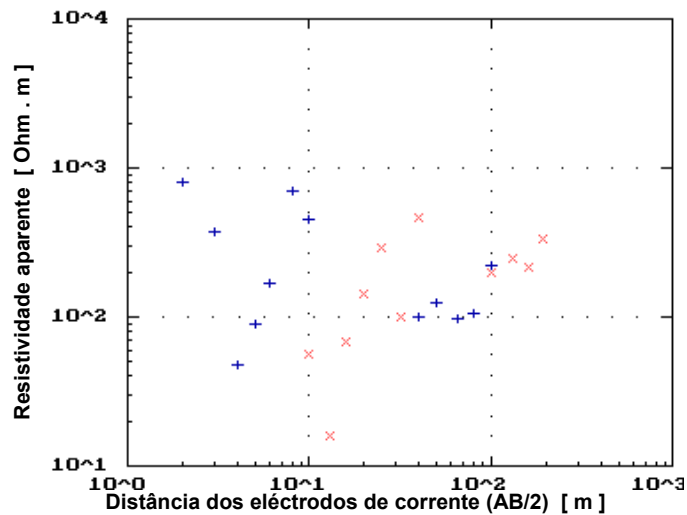


Figura 5-16 – Dados de campo da SEV 4.

A curva aproximada e o respectivo modelo apresentam-se na figura 5-17. O erro quadrático médio que se encontra associado ao modelo é RMS = 3 %.

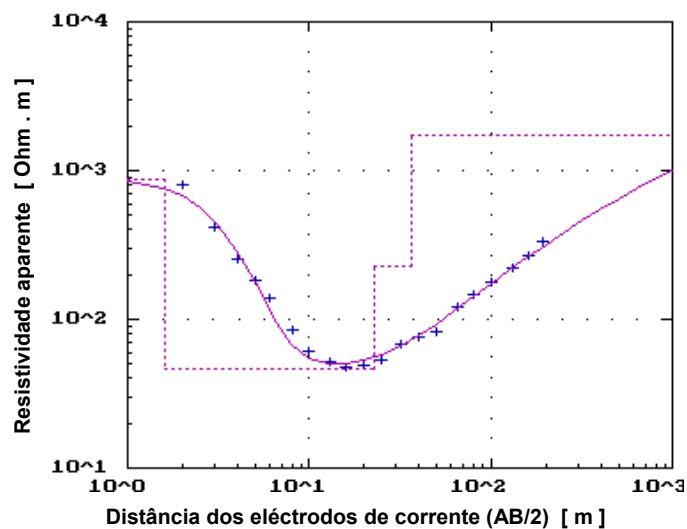


Figura 5-17 – Modelo obtido da inversão dos dados transformados da SEV 4.

O número de camadas interpretadas a partir dos dados constantes do gráfico da Figura 5-17, bem como a sua espessura, apresentam-se na Tabela 5-4.

Camada	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)
1	880.0	1.6
2	45.9	21.2
3	229.5	13.9
4	1750.4	-

Tabela 5-4 – Valores obtidos a partir da interpretação da SEV 4.

A sondagem 5 e o respectivo modelo ajustado apresentam-se na Figura 5-18.

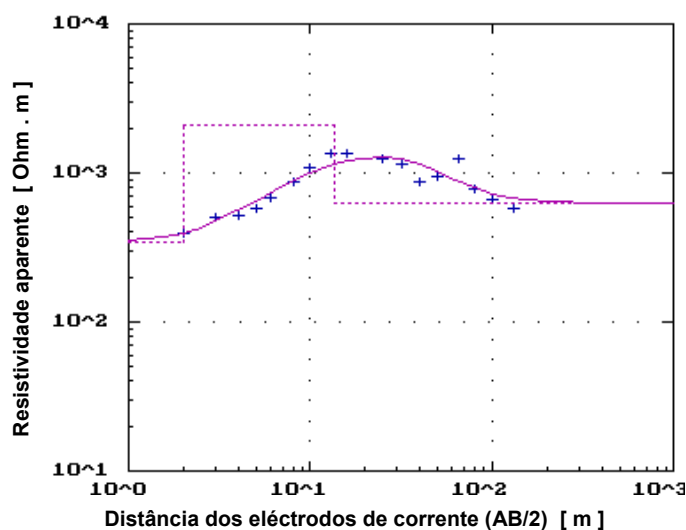


Figura 5-18 – Modelo obtido da inversão da SEV 5.

Neste último caso, aproximou-se a curva do modelo o mais possível. As discordâncias advêm de picos de valores obtidos no campo. O erro quadrático médio associado ao modelo é $RMS = 3 \%$.

O número de camadas interpretadas a partir dos dados constantes do gráfico da Figura 5-18, bem como a sua espessura, apresentam-se na Tabela 5-5.

Camada	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)
1	343.1	2.0
2	2122.0	11.4
3	626.5	-

Tabela 5-5 – Valores obtidos a partir da interpretação da SEV 5.

Deve-se ter em atenção que todo o trabalho foi realizado numa zona extremamente fracturada, o que é muito prejudicial à realização das SEV's. Estas idealmente deveriam ser realizadas em meios horizontalmente estratificados e homogéneos.

Os valores de campo obtidos nesta campanha de prospecção geo-eléctrica, apresentam-se de muito má qualidade. Isto é, os valores de resistividade obtidos têm muitas irregularidades (picos). As próprias embraiagens que deveriam dar valores aproximados, dão, na maioria das vezes, valores muito díspares, situação que se manifesta de forma particularmente evidente nas SEV's 2 e 4.

Os valores resultantes da inversão, obtidos para as espessuras das camadas identificadas, corresponderão em campo à camada superficial de solo, seguida de horizontes de material mais ou menos alterado, de acordo com a sua localização.

5.4. Abordagem geoestatística dos resultados obtidos na prospecção VLF-EM

5.4.1. Objectivos e metodologia

Uma das características mais determinantes no estudo de um recurso natural é a análise da forma dos diferentes corpos que integram e compõem esse recurso.

Entende-se como Morfologia Geoestatística o conjunto dos métodos e modelos geoestatísticos de estimação da forma de corpos mineralizados (Soares, 1989).

Partindo de um conjunto de amostras discretas, existem dois métodos que permitem aceder à estimação da forma de um corpo:

- 1) Métodos em que se obtém directamente a forma do corpo;
- 2) Métodos que definem a forma do corpo com base no conjunto de pontos que lhe pertencem;

Nestes últimos, a forma obtém-se através de mapas de probabilidades, estimados a partir de uma variável indicatriz.

$$I(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } Z(x) > z & (x \in X) \\ 0 & \text{se } Z(x) \leq z & (x \in X^c) \end{cases}$$

Na escolha dos modelos geoestatísticos a utilizar na estimação da forma de um corpo, é previamente analisada a disposição do corpo dentro da área a estudar. Um corpo pode estar completamente definido dentro da área, ou seja, a sua dispersão processa-se de forma não estacionária ou, pelo contrário, pode abranger apenas uma parte da área, isto é, a dispersão processa-se de forma estacionária.

Neste caso, é permitida a aplicação de métodos geoestatísticos estacionários, como seja a krigagem ordinária.

5.4.1.1. Abordagem utilizada

Com base na informação obtida na primeira campanha de prospecção geofísica – prospecção efectuada através do método VLF-EM – procedeu-se ao tratamento dos dados de acordo com os critérios que abaixo se discriminam.

- A malha do campo de trabalho foi discretizada em células de 10 m x 10 m, e situa-se entre as coordenadas representadas na Figura 5-19 (a malha da quadrícula representada na figura é de 100 m x 100 m e não de 10 m x 10 m, por uma questão de facilidade de leitura);

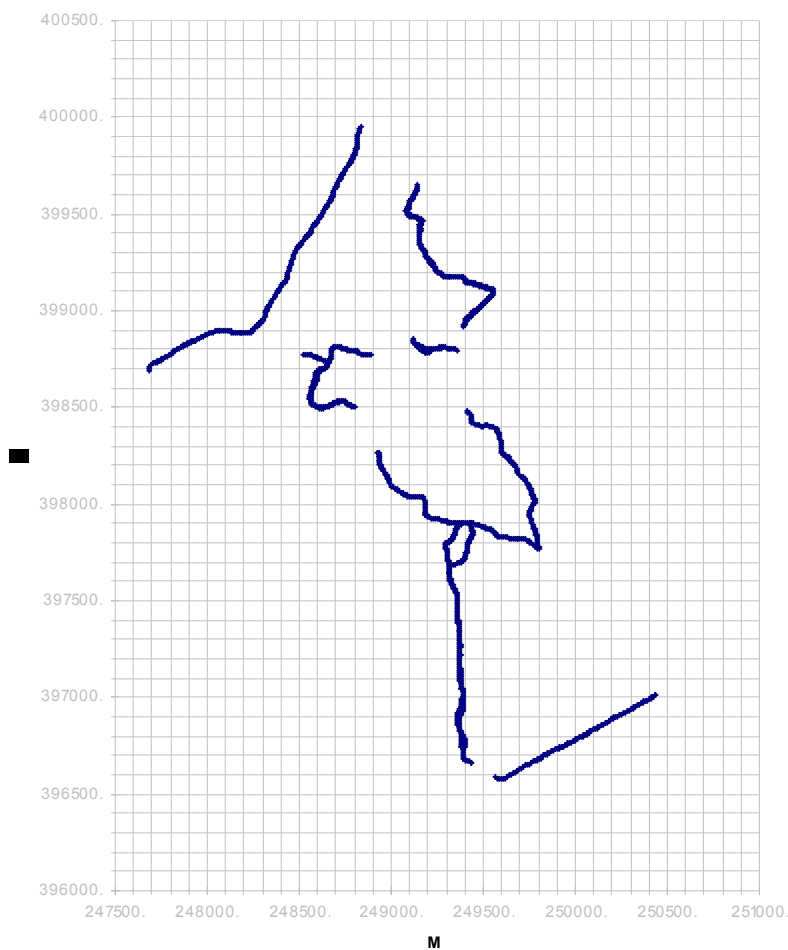


Figura 5-19 – Campo de trabalho e amostragem utilizada.

- O ficheiro de partida foi construído a partir da amostragem inicialmente efectuada, após discretização dos dados em células de 10 m x 10 m.
- Em seguida foram consideradas como zonas não amostradas as zonas consideradas como não interpretáveis, isto é, em que as leituras foram efectuadas sob a influência de linhas de alta tensão, tendo sido excluídos os dados a elas referentes;
- Obteve-se assim um ficheiro constituído por 1081 pontos, em conformidade com a Figura 5-19, encontrando-se os pontos de amostragem representados a azul;
- Seguiu-se uma etapa de codificação binária, tendo sido atribuídos valores de 1 aos locais em que foram detectadas falhas/fracturas e valores de 0 aos locais em que as mesmas não foram detectadas. As características do ficheiro de partida após a codificação binária apresentam-se na Tabela 5-6. Os locais codificados como 1, ou seja, aqueles em que foram detectadas falhas ou fracturas através da prospecção, representam-se na Figura 5-20.

Média	0.062905
Erro-padrão	0.007388
Desvio-padrão	0.242904
Variância da amostra	0.059002
Curtose	11.02064
Assimetria	3.605586
Intervalo	1
Mínimo	0
Máximo	1
Soma	68
Contagem	1081

Tabela 5-6 – Estatísticos básicos do ficheiro de partida.

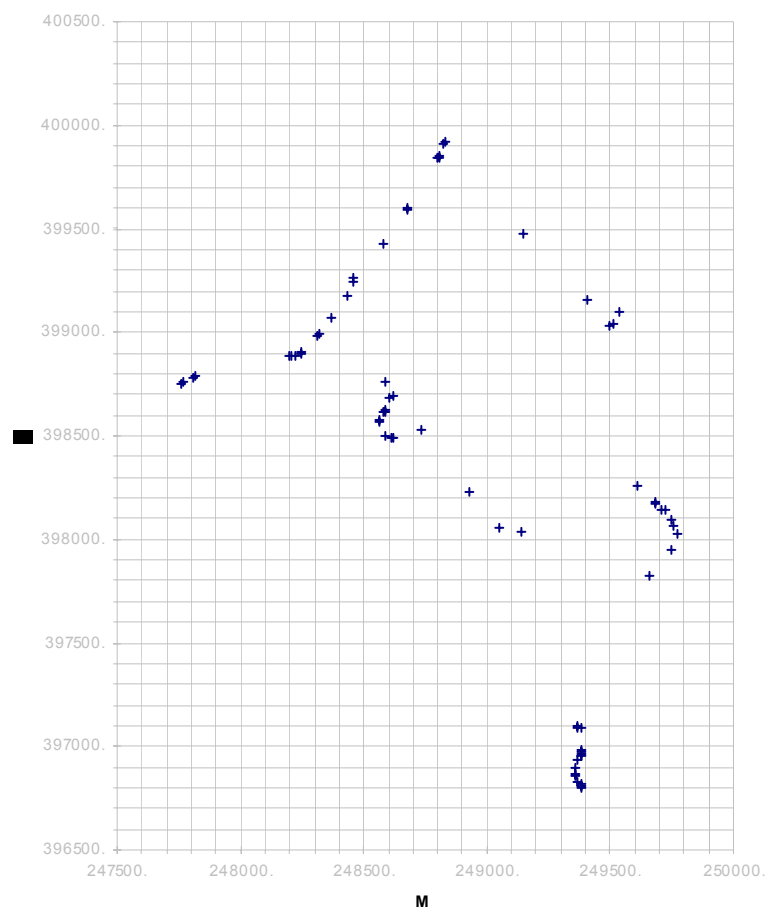


Figura 5-20 – Locais em que foram detectadas falhas/fracturas (locais referidos representados a azul).

A estimação da forma de um corpo pode ser sintetizada nos seguintes passos:

1. Obtenção de uma variável indicatriz;

Uma variável indicatriz é uma variável que se elabora à custa de dois símbolos apenas, que representam estados mutuamente exclusivos. Uma variável indicatriz para um certo evento E define-se como a variável aleatória que assume apenas um de dois valores 0 e 1, assumindo o valor 1 quando o evento E tem lugar e 0 de maneira diferente. Também dentro de determinada

área A que contém n pontos, cada ponto pode ser classificado como pertencente a um de dois estados (sim ou não, presença ou ausência, 1 ou 0, ou outros) consoante os seus valores se situem acima ou abaixo de determinado valor, designado de valor de corte.

2. Estimação dessa variável indicatriz, com obtenção de um mapa de probabilidades;
3. Transformação do mapa de probabilidades em mapa binário, a fim de obter a forma do corpo;

Outras etapas poderão eventualmente seguir-se, designadamente a atribuição de zonas de incerteza à forma anteriormente obtida.

5.4.2. Variografia

Um passo fundamental em qualquer estudo geoestatístico que incorpore a informação estrutural da variável que se pretende estudar é a construção de variogramas experimentais segundo diversas direcções do espaço (*Isaaks & Srivastava, 1989*).

É através dos variogramas que a informação estrutural é evidenciada, sendo, além disso, também com base nesta função que as subseqüentes estimações por krigagem são efectuadas.

Assim, a partir da aplicação de uma função indicatriz aos valores obtidos na primeira campanha de prospecção geofísica obtém-se uma variável transformada, a qual é submetida a modelação variográfica, tendo em vista a sua estimação sistemática por krigagem, numa malha estabelecida de acordo com os objectivos definidos.

A exploração inicialmente efectuada aos dados sugeriu a aplicação aos mesmos de apenas um variograma (variograma omnidireccional) em detrimento de diversos variogramas direccionais, uma vez que não se afigurava tarefa fácil a identificação de direcções preferenciais de continuidade espacial.

O variograma omnidireccional foi construído com base na expressão dada pela Equação 5-1.

$$\gamma_I(z, h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [I_z(x_i) - I_z(x_i + h)]^2 \quad (\text{Eq. 5-1})$$

que representa o valor médio do quadrado das diferenças entre todos os pares de pontos existentes no campo geométrico, distanciados de h , sendo:

$\gamma_I(z, h)$ - variograma da variável indicatriz;

$N(h)$ - número de pares de pontos, (x_i) e $(x_i + h)$, distanciados de h ;

$I_z(x_i)$ - valor da variável indicatriz no ponto (x_i) ;

$I_z(x_i + h)$ - valor da variável indicatriz no ponto $(x_i + h)$;

Com vista à construção do variograma são necessários alguns parâmetros referentes à caracterização das direcções:

- Azimute (θ) – define o ângulo, medido no sentido dos ponteiros do relógio, que a projecção da direcção no plano horizontal faz com o eixo dos yy’;
- Inclinação (ϕ) – representa o ângulo que o versor da direcção faz com o plano horizontal;
- Regularização (R) – é o ângulo correspondente ao cone cujo eixo é a direcção fixada;
- Passo (p) – é a amplitude do intervalo regular de classes de distância;
- Distância de corte – é a distância máxima até à qual se calcula o valor do variograma experimental;

Este conjunto de parâmetros permite fazer corresponder cada par de pontos a uma determinada classe de distância, conforme este se inclua, ou não, no cone de direcção escolhido.

O variograma normalmente exhibe um ramo crescente para valores pequenos de h , tendendo para um patamar a partir de uma certa distância.

Algumas características importantes do variograma são:

- Amplitude – distância a partir da qual as amostras deixam de se encontrar correlacionadas;
- Patamar – variância “a priori” da variável, que reflecte a dispersão para distâncias superiores à amplitude;
- Efeito de pepita (C_0) – descontinuidade na origem do variograma expressa pela ordenada na origem, causada pela eventual existência de erros de amostragem e/ou micro-regionalizações inferiores à escala utilizada;

Após a construção do variograma experimental procede-se ao ajustamento do modelo teórico que melhor traduz o comportamento dos dados. Existem diversos modelos teóricos utilizados no ajustamento do variograma, designadamente os modelos esférico, exponencial e gaussiano. A Equação 5-2 representa matematicamente um modelo de variograma com duas estruturas – modelo exponencial e efeito de pepita – cujo ajustamento foi adoptado no presente trabalho.

$$\begin{cases} \gamma(h) = c_0 + c_1 \left[1 - e^{-\frac{3h}{a}} \right] & h < a \\ \gamma(h) = c_0 + c_1 & h \geq a \end{cases} \quad (\text{Eq. 5-2})$$

5.4.2.1. Construção do variograma

O variograma é um instrumento de detecção estrutural que evidencia eventuais anisotropias, permitindo analisar a continuidade espacial da variável regionalizada.

Foram elaborados variogramas experimentais em diversas direcções do campo de amostragem. Contudo, optámos no presente trabalho por adoptar o modelo de ajuste representado pelo variograma omnidireccional. Com efeito, as direcções escolhidas, bem como, aliás, as próprias técnicas de estimação utilizadas, induziam um enviesamento indesejado no resultado final.

Com vista à construção do variograma omnidireccional, considerou-se uma regularização de 180°, permitindo que todas as direcções do campo sejam representadas por apenas um

variograma. Na Tabela 5-7 apresentam-se os resultados obtidos, com base em 35 classes de distância, com um passo de 120 m.

Classe de distância	h	g (h)	N (pontos)
Classe 1	63.3707	0.0554	17205
Classe 2	177.8056	0.0525	19837
Classe 3	299.2646	0.051	19695
Classe 4	421.7421	0.0547	26305
Classe 5	540.1721	0.0527	32563
Classe 6	658.3101	0.0512	33313
Classe 7	779.3443	0.0576	32091
Classe 8	900.743	0.0625	37763
Classe 9	1019.501	0.0673	44370
Classe 10	1138.554	0.0577	42146
Classe 11	1257.125	0.0521	37063
Classe 12	1377.075	0.0585	28545
Classe 13	1498.765	0.057	24374
Classe 14	1619.798	0.056	23837
Classe 15	1739.588	0.0574	24189
Classe 16	1857.811	0.0706	21158
Classe 17	1977.06	0.0735	15979
Classe 18	2103.696	0.0619	15677
Classe 19	2217.554	0.0597	16823
Classe 20	2340.419	0.0704	15995
Classe 21	2453.162	0.0718	12132
Classe 22	2575.228	0.0622	7535
Classe 23	2703.981	0.0814	6402
Classe 24	2822.725	0.0573	9267
Classe 25	2936.429	0.0484	8335
Classe 26	3053.744	0.0509	5255
Classe 27	3175.505	0.0389	3094
Classe 28	3293.746	0.121	1856
Classe 29	3392.363	0.1189	328
Classe 30	0	0	0
Classe 31	0	0	0
Classe 32	0	0	0
Classe 33	0	0	0
Classe 34	0	0	0
Classe 35	0	0	0

Tabela 5-7 – Resultados da variografia.

O efeito de pepita utilizado no ajustamento, $C_0 = 0.022$, representa 37.3 % da variância (0.059) do fenómeno, significando, portanto, que 62.7 % da variabilidade se utiliza no processo de estimação. A amplitude do variograma tem o valor de 500 m. Na Figura 5-21 apresenta-se o variograma experimental bem como o modelo teórico ajustado.

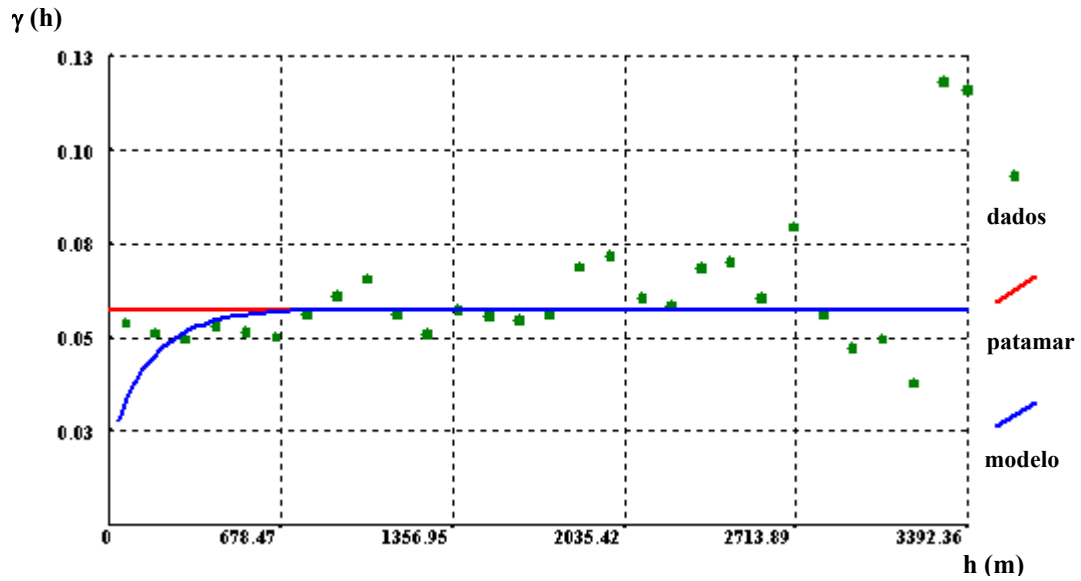


Figura 5-21 – Variograma experimental omnidireccional e modelo teórico ajustado.

Como já foi anteriormente referido, no ajustamento do variograma foi utilizado o modelo exponencial, com efeito de pepita. A expressão geral do modelo ajustado apresenta-se na Equação 5-3.

$$\begin{cases} \gamma(h) = 0.022 + 0.037 \left[1 - e^{-\frac{3h}{500}} \right] & h < a \\ \gamma(h) = 0.022 + 0.037 & h \geq a \end{cases} \quad (\text{Eq. 5-3})$$

5.4.3. Krigagem

Qualquer ponto não amostral pode ser estimado através de uma combinação linear ponderada dos valores experimentais de uma variável regionalizada nas amostras vizinhas (Equação 5-4).

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (\text{Eq. 5-4})$$

onde

$Z^*(x_0)$ - estimador da variável;

$Z(x_i)$ - conjunto dos valores experimentais;

λ_i - ponderador a atribuir a cada valor experimental;

Na estimação por krigagem, a noção de vizinhança das amostras é mais rica do que a simples distância entre elas. Assim, em cada ponto estimante (amostra) o ponderador é atribuído em

função de uma noção de proximidade que envolve um conceito mais rico e abrangente, que é o conceito de distância estrutural.

Desta forma, à influência das relações de distância entre amostras, esta relação acrescenta elementos da estrutura e variabilidade espacial das mesmas recolhidos na análise variográfica. A qualidade do estimador da variável, $Z^*(x_0)$, é condicionada pela combinação do valor de cada ponderador afecto aos pontos amostrais. Desta situação decorrerá, em cada ponto estimado, uma diferença entre valor real e valor estimado – o erro de estimação (Equação 5-5).

$$e(x_0) = Z^*(x_0) - Z(x_0) \quad (\text{Eq. 5-5})$$

No conjunto de n valores estimados, a variância do erro é dada por (Equação 5-6):

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e(x_i) - m_e)^2 \quad (\text{Eq. 5-6})$$

com

$e(x_i)$ - erro de estimação;

m_e - média do erro de estimação;

Da estacionaridade, num dado domínio espacial, decorre que a esperança da variável aleatória é, em qualquer ponto, igual à média (Equação 5-7)

$$E\{Z(x_i)\} = m \quad (\text{Eq. 5-7})$$

O rigor de um critério de estimação pode ser avaliado em face de dois parâmetros: a média e a variância dos erros que lhe estão associados.

A fim de inviabilizar a predominância sistemática de valores subestimados ou sobrestimados, a estimação deve conduzir a uma média do erro de estimação nula, $m_e = 0$.

Por outro lado, a dispersão do erro em torno do valor médio (Equação 5-6) deve ser mínima.

Diferentes métodos de estimação conduzem a diferentes erros de estimação, face às múltiplas possibilidades de combinação do peso a atribuir aos ponderadores de cada variável de valor conhecido.

Por serem uma incógnita os valores reais das variáveis nos pontos estimados, não é possível a determinação do erro médio nem da variância de estimação. Há, contudo, uma única combinação de ponderadores capaz de garantir o menor erro de estimação, objectivo que é atingido na krigagem.

Nesta metodologia é utilizado um modelo probabilístico baseado nos dados amostrais disponíveis, sobre os quais o peso dos ponderadores é calculado segundo um algoritmo que, assegurando nula a média do erro, garante simultaneamente a minimização da sua variância.

A condição de não enviesamento impõe que $m_e = 0$; assim:

$$m_e = E\{Z^*(x_0) - Z(x_0)\} = 0$$

$$E\left\{\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) - Z(x_0)\right\} = 0$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \mathbf{E} \{ \mathbf{Z}(\mathbf{x}_i) \} - \mathbf{E} \{ \mathbf{Z}(\mathbf{x}_0) \} = \mathbf{0}$$

Atendendo à estacionaridade da função aleatória (Equação 5-7)

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \lambda_i \mathbf{m} - \mathbf{m} &= \mathbf{0} \\ \Rightarrow \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i &= \mathbf{1} \quad (\text{Eq. 5-8}) \end{aligned}$$

O valor a atribuir a cada ponderador é obtido por intermédio da resolução de um sistema de equações, condicionado pela restrição do somatório dos ponderadores totalizar a unidade (Equação 5-8), minimizando a variância do erro através da introdução de parâmetros extraídos do variograma da variável a estimar:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(\mathbf{h}_{ij}) + \mu = \gamma_{i0} \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = \mathbf{1} \end{cases} \quad \forall_{i=1, \dots, n}$$

em que:

λ_i - ponderadores a atribuir a cada ponto amostral;

$\gamma(\mathbf{h}_{ij})$ - semi-variância entre as amostras;

γ_{i0} - semi-variância entre o ponto i e o ponto a estimar;

μ - multiplicador de Lagrange;

Em notação matricial, o sistema de equações anterior pode ser escrito como:

$$\begin{bmatrix} \gamma(\mathbf{h}_{11}) & \dots & \gamma(\mathbf{h}_{1n}) & \mathbf{1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(\mathbf{h}_{n1}) & \dots & \gamma(\mathbf{h}_{nn}) & \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & \dots & \mathbf{1} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(\mathbf{h}_{10}) \\ \vdots \\ \gamma(\mathbf{h}_{n0}) \\ \mathbf{1} \end{bmatrix}$$

ou

$$[\gamma] \cdot [\lambda] = [\mathbf{D}] \quad (\text{Eq. 5-9})$$

O conjunto de ponderadores que conduzem a uma estimação não enviesada com minimização da variância do erro, obtém-se pela operação matricial:

$$[\lambda] = [\gamma]^{-1} \cdot [\mathbf{D}]$$

5.4.3.1. Estimação da proporção e morfologia das fracturas

Irá agora, com base no ficheiro de partida, proceder-se à estimação por krigagem da proporção e morfologia das fracturas constantes do campo de amostragem.

A estimação é efectuada partindo de uma malha de pontos amostrais, onde os valores assumidos pelos pontos são convertidos na variável dicotómica indicatriz, determinando os valores de 1 e 0, consoante seja, ou não, estabelecida a situação de pertença a uma falha ou fractura (“corpo”) localizada no campo amostral.

Assim, para cada amostra é definida uma variável indicatriz, $I(x_i)$, associada a um corpo X , de forma que:

$$I(x_i) = \begin{cases} 1 & \Leftarrow x_i \in X \\ 0 & \Leftarrow x_i \notin X \end{cases}$$

O estimador dos pontos não amostrais é determinado pela combinação linear ponderada dos valores das amostras experimentais x_i , assumidas num espaço estruturalmente ligado:

$$I^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i I(x_i)$$

A conversão dos pontos amostrais numa variável indicatriz, permite atribuir-lhe o conceito de probabilidade de determinada amostra pertencer, ou não, ao corpo. Nesta perspectiva, em pontos não amostrais o estimador da indicatriz (resultado da combinação linear das amostras vizinhas) assume idêntico significado.

Assim, a forma estimada numa malha de pontos não amostrais, pode ser referida a um mapa de probabilidades dos valores estimados pertencentes ao corpo, em que a média dos estimadores representa a proporção de corpo estimado:

$$\overline{I^*(x)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I^*(x_i)$$

Esta é, também, dada pelo quociente entre o número de pontos constituintes do corpo estimado, P , e o número total de pontos, N :

$$\overline{I^*(x)} = \frac{P}{N} \quad (\text{Eq. 5-10})$$

Sendo N conhecido, calculando a média dos estimadores de krigagem, $\overline{I^*(x)}$, é possível obter o número de pontos, P , pertencentes à área estimada do corpo, donde decorre que o corpo

estimado, X^* , será constituído pelos P (P = número inteiro, arredondado por excesso) valores de maior probabilidade estimada.

A distribuição gráfica destes P pontos, identificados numa transformação do mapa de probabilidades em mapa binário, representará a morfologia do corpo.

* * *

A estimação realizou-se numa malha regular, de 93626 blocos (correspondentes a 277 blocos na direcção x , 338 na direcção y e 1 bloco na direcção z) os quais foram discretizados num único ponto central.

Cada célula tem dimensões 10 m x 10 m x 1 m, sendo as coordenadas dos pontos centrais que definem os limites da área estimada, as seguintes:

M: de 247680 a 250440.

P: de 396580 a 399950.

A estimação foi efectuada com base na krigagem ordinária, através do método simples de busca das amostras, isto é seleccionando apenas as amostras mais próximas do ponto a estimar, segundo qualquer direcção. Foi utilizado um mínimo de 1 amostra e um máximo de 16 amostras com vista à estimação de cada ponto, correspondendo o raio máximo de procura ao produto do espaçamento pelo número de blocos nas direcções principais (2770 x 3380 x 1).

Os estatísticos básicos dos valores obtidos na estimação apresentam-se na Tabela 5-8.

Média	0.08438827
Erro-padrão	0.0003751731341291
Desvio-padrão	0.114797
Variância	0.013
Curtose	5.077
Assimetria	1.877
Intervalo	1
Mínimo	0
Máximo	1
Soma	7900.936
Contagem	93626

Tabela 5-8 – Estatísticos básicos dos valores estimados.

A média dos estimadores, ou proporção de falhas ou fracturas na área estimada, $\overline{I^*(x)}$, e o correspondente número de pontos estimados, P , apresentam-se abaixo.

$$\overline{I^*(x)} = 0.08438827$$

$$P = 0.08438827 \times 93626 = 7900.936 \approx 7901$$

Desta forma, a projecção dos 7901 maiores pontos obtidos na krigagem, permite estimar a morfologia do campo, em termos de fracturação. O resultado desta projecção apresenta-se na Figura 5-22.

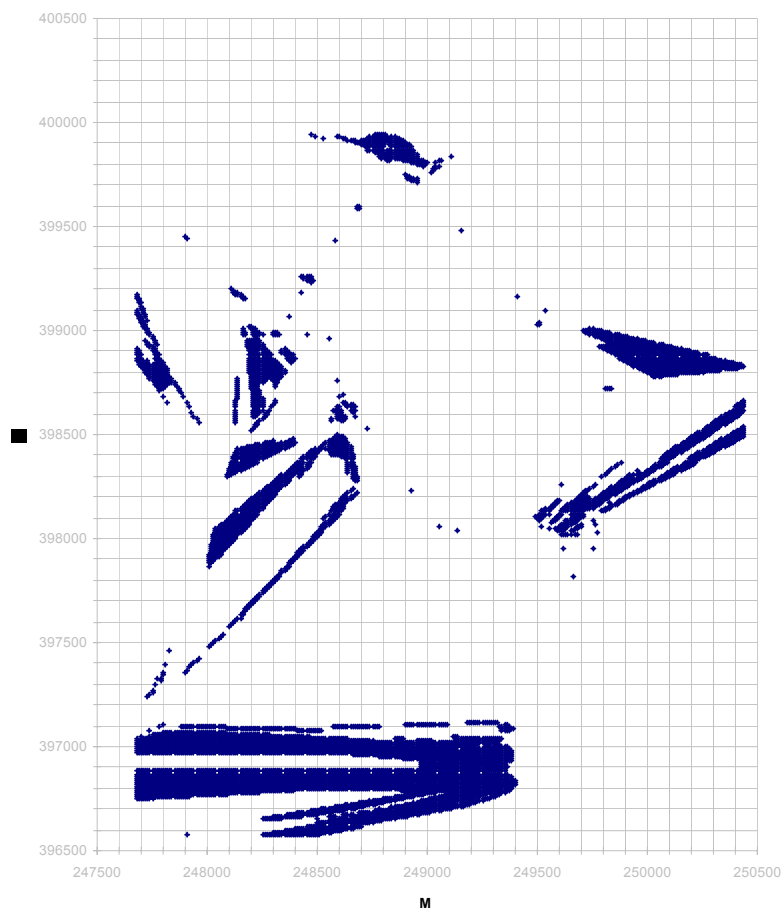


Figura 5-22 – Aspecto da morfologia apresentada pelo campo após a estimação.

São especialmente notórios diversos lineamentos, sendo também, para além disso, possível apreciar a existência de algumas tendências lineares constatadas em campo.

Apresenta-se na Figura 5-23 uma carta de fracturação, extraída da Figura 5-5 e elaborada com base em dados recolhidos na sequência dos trabalhos da primeira campanha de prospecção geofísica e em reconhecimento de campo, a fim de que seja possível proceder à comparação desta com a obtida por krigagem.

Deve notar-se que a codificação inicial foi realizada de forma conservativa, uma vez que a interpretação gráfica que revela a existência de uma fractura foi efectuada de forma a que muito poucos pontos tenham sido codificados como 1's;

Outras codificações menos conservativas proporcionarão diferentes interpretações, tanto em termos quantitativos como qualitativos, relativamente aos lineamentos considerados como iniciais, como aos lineamentos estimados.

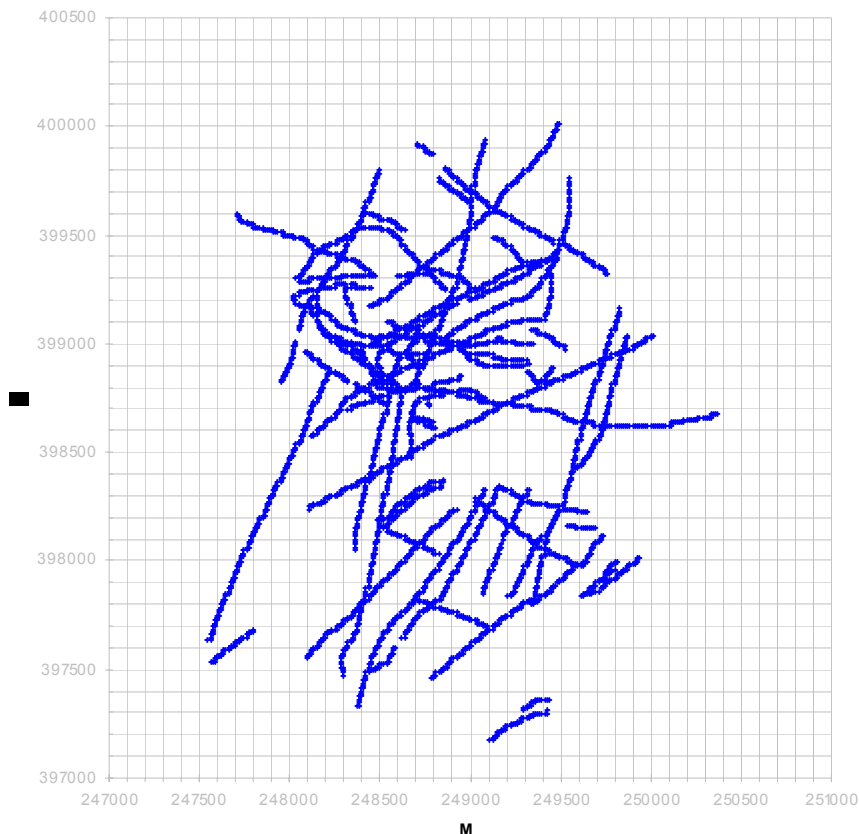


Figura 5-23 – Carta de fracturação extraída da Figura 5-5.

A comparação das duas figuras revela, no entanto, algumas características interessantes:

Parecem existir direcções de fracturação comuns – as importantes direcções localizadas no centro do campo, que se desenvolvem a N da área mineira, correspondem ao conjunto de pontos linearizados localizados na mesma posição relativa na figura 5-22.

Contudo, algumas direcções que na figura 5-22 se apresentam perfeitamente linearizadas, não parecem ter correspondência com as traçadas na figura 5-23.

Uma das razões que nos levaram a não proceder à krigagem com base em variogramas direccionais, prende-se com a quase total ausência de estruturação da variável segundo certas direcções, o que se traduzia em maior incerteza relativamente ao resultado da estimação.

Foi justamente para evitar essa incerteza acrescida que optámos por eleger o variograma omnidireccional como o melhor descritor do comportamento da variável regionalizada no campo de estimação.

Por outro lado, a utilização da busca por quadrantes como método de selecção das amostras utilizadas com vista à estimação de um dado ponto, influenciava fortemente os resultados da

estimação, que evidenciavam marcadas tendências de alinhamentos segundo as direcções dos variogramas.

Foi por essa razão que optámos pelo método de busca simples, utilizando apenas as amostras mais próximas do ponto a estimar segundo qualquer direcção, como método de selecção das amostras utilizadas com vista à estimação dos pontos.

Finalmente, o estabelecimento de correspondência entre os resultados da prospecção geofísica e a identificação das fracturas presentes no campo de trabalho através da codificação binária efectuada, parece constituir uma boa aproximação tendo em vista a posterior estimação da morfologia da fracturação.

6. Caracterização da fracturação

Designam-se de neotectónicos os movimentos ocorridos após a última reorganização significativa da tectónica regional (Cabral, 1995).

Devido a considerações várias, designadamente modificações do regime tectónico estabelecido na região do Arco de Gibraltar, que passa de uma extensão E-W a ENE-WSW no Pliocénico superior a uma compressão NW-SE a NNW-SSE no Quaternário inferior, considera-se a Neotectónica como a actividade tectónica ocorrida desde o Pliocénico terminal até à actualidade, o que permite situá-la no período compreendido entre cerca de -2 milhões de anos (M.A.) e o presente, considerando-se activas todas as estruturas geológicas com evidências de movimentação no decurso deste período de tempo.

A actuação da tensão tectónica em Portugal continental no período neotectónico acima indicado, originou movimentos em falhas activas, entre outros efeitos que traduzem as deformações regional e global que igualmente se fizeram sentir.

Esta deformação, particularmente a de carácter frágil, depende bastante das descontinuidades anteriormente existentes, que funcionam como zonas preferenciais de rotura em que se verifica a reactivação da fracturação, em situações de aplicação de novas forças tectónicas.

Como consequência da reactivação da fracturação, as falhas activas no território do continente distribuem-se de acordo com direcções Hercínicas, designadamente NNE-SSW a ENE-WSW e NW-SE a NNW-SSE, equivalentes a falhas de desligamento originadas no primeiro episódio de fracturação tardivarisca (Ribeiro *et al.*, 1979).

Dependendo da orientação das estruturas e das particularidades do campo de tensões, assim as falhas activas podem assumir carácter de falhas predominantemente inversas, falhas de desligamento ou falhas normais (ver Carta Neotectónica de Portugal Continental, apresentada na Figura 6-1).

As falhas activas que foram consideradas mais importantes para este estudo, pela sua proximidade com a zona de Castelejo, encontram-se assinaladas a azul na legenda da Figura 6-1. São elas a falha Seia-Lousã, a falha Manteigas-Vilariça-Bragança e a falha Penacova-Régua-Verín, às quais vamos agora proceder a uma breve análise.

- Falha Seia-Lousã

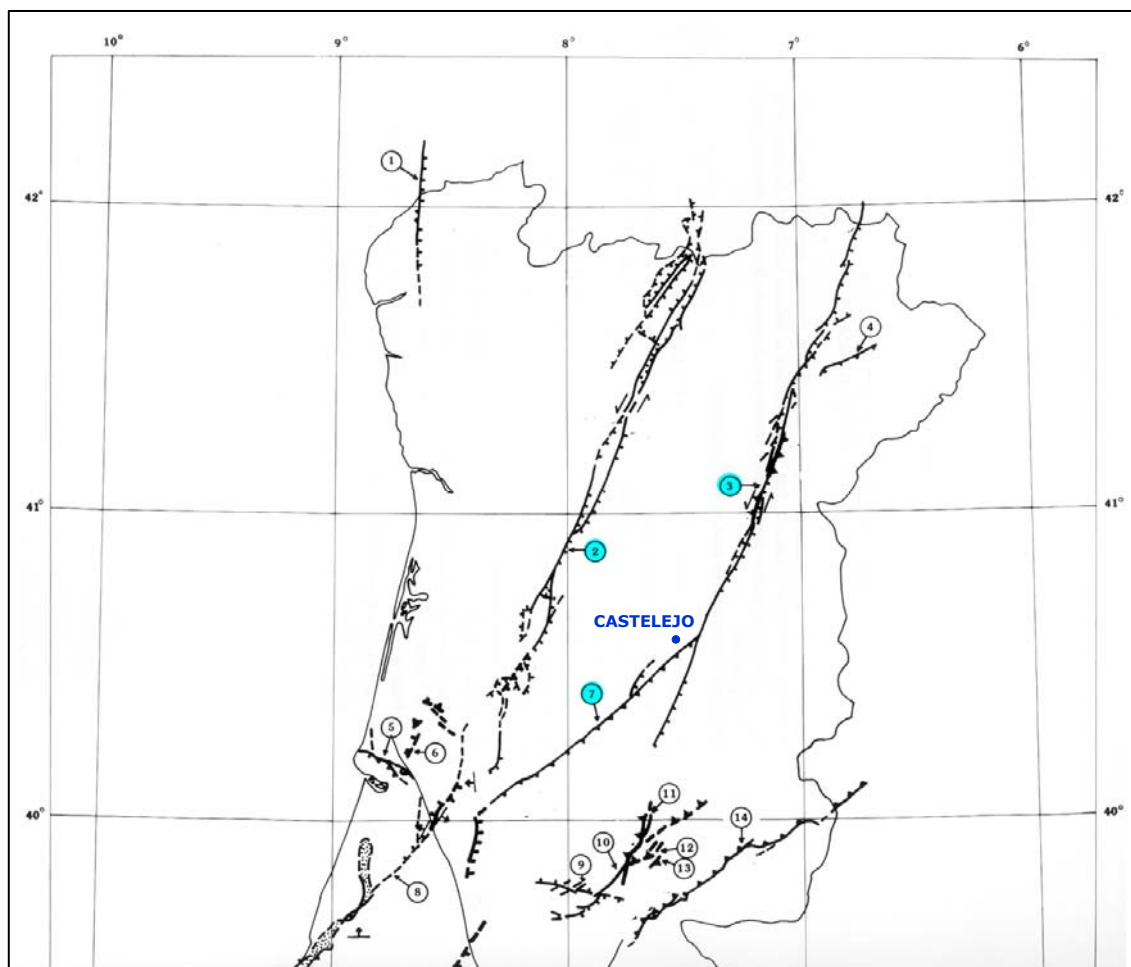
Trata-se de uma falha de direcção N50°E, com componente predominante de movimentação inversa, que delimita a estrutura em “horst” compressivo Alpino de direcção ENE-WSW, que constitui a Cordilheira Central.

Coloca em contacto o soco, constituído basicamente por rochas do Complexo Xisto-Grauváquico (C.X.G.) com os sedimentos que preenchem a bacia sedimentar de Lousã-Arganil, constituindo simultaneamente o limite NW da Cordilheira Central e o limite SE da bacia sedimentar, apresentando um comprimento total de aproximadamente 100 Km. Contacta a NE com a falha Manteigas-Vilariça-Bragança.

- Falha Manteigas-Vilariça-Bragança

Trata-se de uma falha de direcção NNE-SSW, com componente predominante de movimentação de desligamento esquerdo, embora apresente igualmente evidências de movimentação vertical.

Trata-se de uma falha tardivarisca, que apresenta um comprimento total de aproximadamente 250 Km e se localiza entre Unhais da Serra e Puebla de Sanabria, na província de Zamora, em Espanha. Desloca referências do soco com uma separação horizontal esquerda máxima de cerca de 8 Km, a qual diminui progressivamente para as suas extremidades.



- 1 - Falha de Monte Chão;
- 2 - Falha Penacova-Régua-Verin;
- 3 - Falha Manteigas-Vilarica-Bragança;
- 4 - Falha de Morais;
- 5 - Falha de Quiaios;
- 6 - Falha de Vale Saramago;
- 7 - Falha Seia-Lousã;
- 8 - Falha Nazaré-Pombal;
- 9 - Falha da Sertã;
- 10 - Falha Sobreira Formosa-Grade-Sobral do Campo;
- 11 - Falha de Almaceda;
- 12 - Falha Galdins-Rapoula-Chão da Vã;
- 13 - Falha de Mendares;
- 14 - Falha do Ponsul;

Figura 6-1 – Carta Neotectónica de Portugal Continental
(adaptado de Cabral e Ribeiro, 1988; Cabral, 1995).

- Falha Penacova-Régua-Verin

Trata-se de uma falha de direcção NNE-SSW, com componente predominante de movimentação de desligamento esquerdo, que faz parte do mesmo sistema de fracturas que a falha Manteigas-Vilarica-Bragança, da qual se localiza a cerca de 60 Km a W.

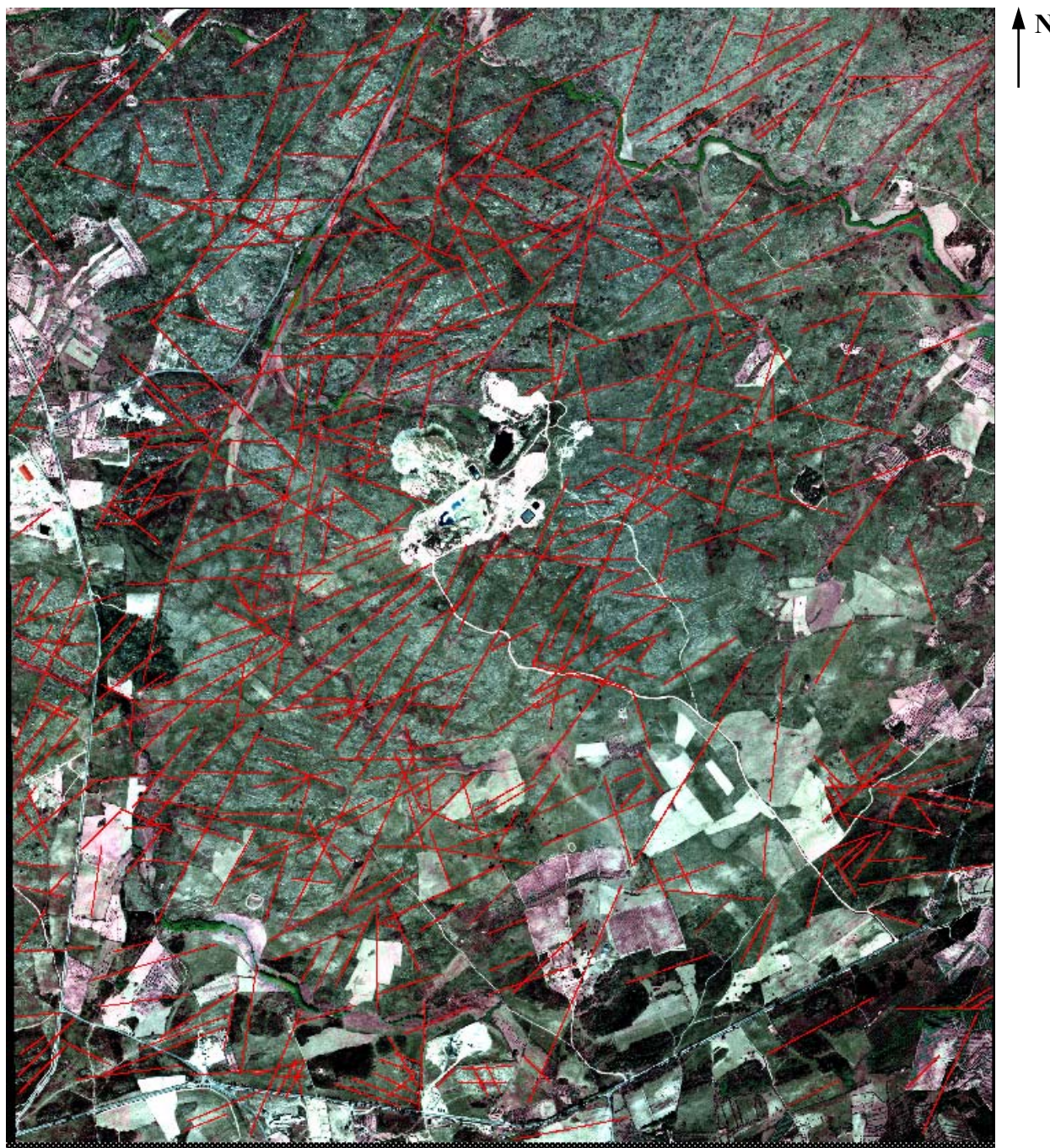
Falha tardivarisca, apresentando um comprimento total de aproximadamente 220 Km e se localiza entre Penacova e Verin, na província de Ourense, em Espanha.

Desloca o soco com uma separação horizontal esquerda máxima de cerca de 3,4 Km.

6.1. A fracturação na mina de Castelejo

6.1.1. Mapa de lineamentos

A fim de melhor interpretar e prever direcções de fluxo preferencial das águas subterrâneas da zona em estudo, foi produzido um mapa de lineamentos. O mapa, em formato digital, foi elaborado com base em fotografia aérea a diversas escalas e apresenta-se na Figura 6-2.



**Figura 6-2 – Mapa de lineamentos dos arredores da mina de Castelejo.
Legenda: fracturas a encarnado; escala aproximada: 1/21290.**

O programa informático utilizado no seu traçado, a ferramenta *Erdas ER Mapper 6*, permitiu, para além do mapa de lineamentos, elaborar uma carta de zonas húmidas, inferindo estas através de técnicas de transformação de cor aplicadas em detecção remota – veja-se a Figura 6-3.

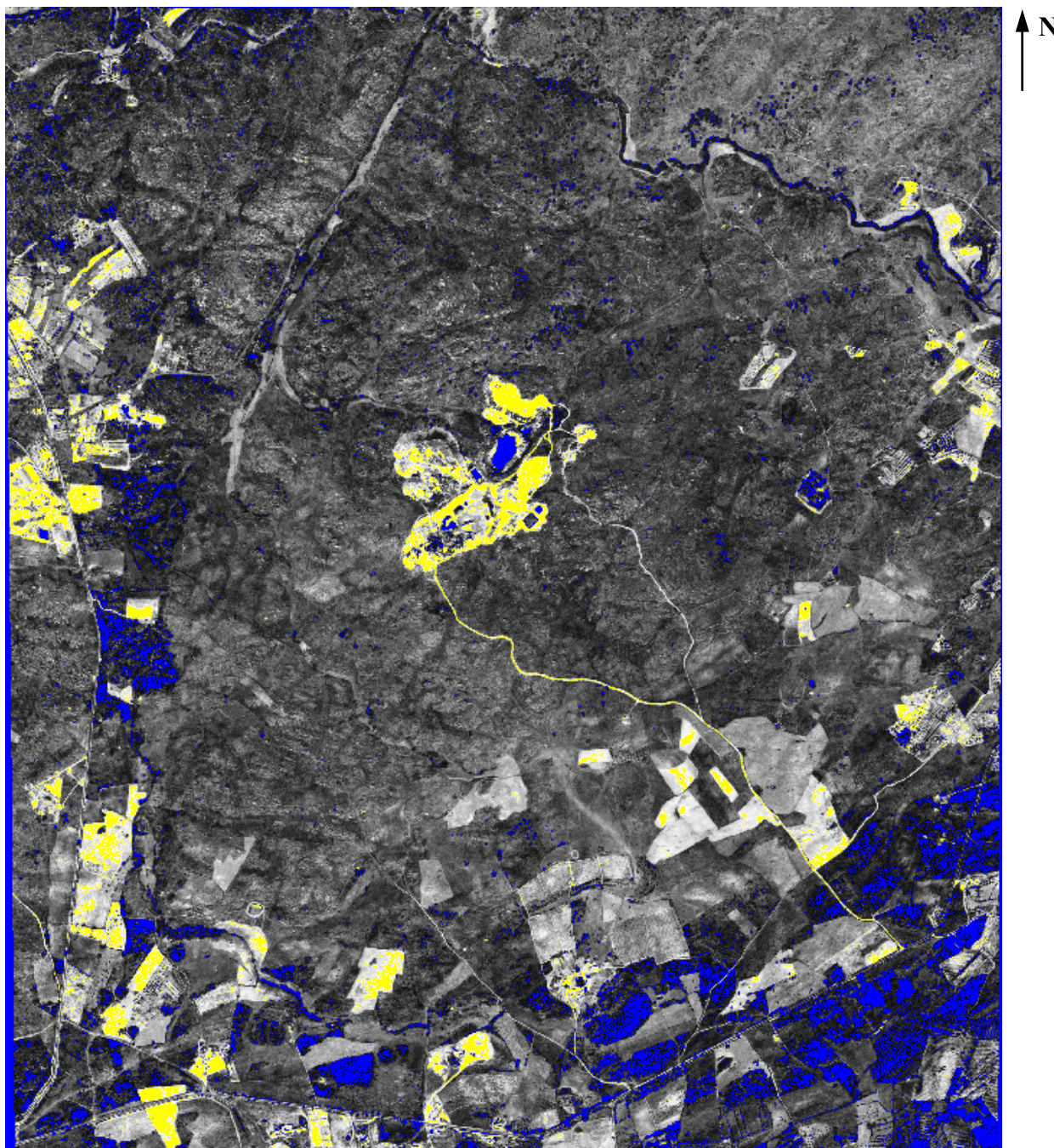


Figura 6-3 – Mapa de zonas húmidas dos arredores da mina de Castelejo.
Legenda: zonas húmidas a azul; escala aproximada: 1/21290.

Finalmente, reproduzindo o cruzamento das duas cartas anteriores, elaborou-se uma carta em que se representam os lineamentos e as zonas húmidas, facilitando a sua interpretação conjunta – ver Figura 6-4.

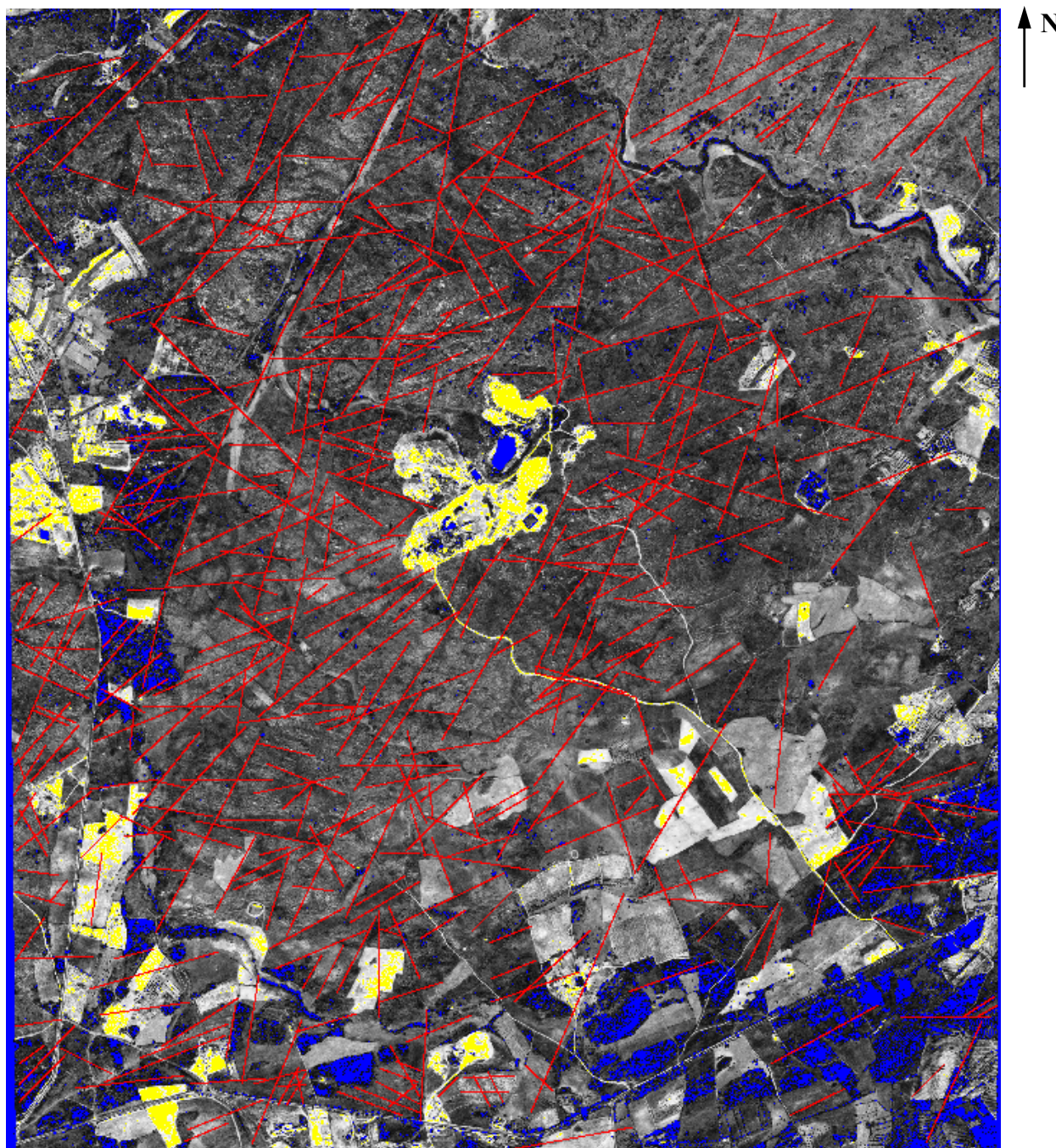


Figura 6-4 – Mapa de lineamentos e zonas húmidas dos arredores da mina de Castelejo.
Legenda: fracturas a encarnado, zonas húmidas a azul; escala aproximada: 1/21290.

Os lineamentos constantes dos mapas apresentados nas Figuras 6-2 e 6-4 foram tratados estatisticamente, tendo permitido obter diversos valores estatísticos, que se reproduzem na Tabela 6-1.

Ponto Médio	Nº de lineamentos	Comprimento mínimo	Comprimento máximo	Comprimento médio	Comprimento total	Ângulo médio
-85	19	86.71	685.1	235.16	4467.99	-85
-80	13	126.68	536.31	304.92	3963.92	-80.5
-75	22	106.79	757.82	260.18	5723.98	-74.9
-70	38	123.21	699.42	257.17	9772.32	-69.6
-65	33	96.12	1007.15	294.6	9721.96	-65.5
-60	38	77.96	771.03	265.36	10083.55	-60.2
-55	18	80.3	938.58	253.64	4565.48	-55.1
-50	21	106.83	703.11	250.05	5251.09	-50.1
-45	14	95.48	736.49	286.89	4016.49	-45.1
-40	13	90.66	471.41	256.92	3339.99	-39.9
-35	18	101.7	1146.1	333.65	6005.64	-35.2
-30	22	118.81	820.13	310.66	6834.58	-30.2
-25	23	98.48	1434.09	367.64	8455.78	-24.6
-20	14	61.46	822.24	298.54	4179.59	-20.3
-15	16	153.74	606.73	311.78	4988.47	-15.2
-10	11	157.39	850.03	315.17	3466.83	-9.8
-5	8	95.26	491	234.81	1878.51	-5.7
0	2	147.01	352.53	249.77	499.54	-0.1
5	3	116.12	192.59	161.48	484.44	4.4
10	2	120.11	190.13	155.12	310.24	9
15	7	104.79	316.11	209.79	1468.5	15.2
20	7	74.47	555.55	226.87	1588.09	19.5
25	6	118.07	258.43	182.18	1093.07	24.9
30	14	101.18	443.36	205.16	2872.22	30.2
35	4	82.2	238.42	137.85	551.4	34.4
40	4	136.2	442.56	254	1016.01	39.7
45	4	124.21	732.93	369.16	1476.63	46.7
50	4	93.01	220.66	152.9	611.6	50.3
55	2	188.67	195.9	192.29	384.57	53.1
60	5	165.8	586.71	307.26	1536.3	60.7
65	16	107.03	449.63	232.02	3712.29	64.8
70	12	91.65	383.23	211.71	2540.49	70.1
75	17	76.87	417.85	251.32	4272.51	75.1
80	11	1.27	445.7	243.99	2683.91	79.5
85	13	91.81	322.08	171.06	2223.73	84.9
90	23	123.04	539.82	277.78	6388.94	89.8
Total	497	1.27	1434.09	266.46	132430.7	

Tabela 6-1 – Valores estatísticos relativos aos lineamentos constantes dos mapas acima apresentados.

Com base nos valores da Tabela 6-1 foi possível traçar as rosas de lineamentos que abaixo se representam. A Figura 6-5 reproduz três diagramas de rosa dos lineamentos obtidos, traçados de 5° em 5° e referentes a: a) número de lineamentos, b) comprimento total dos lineamentos e c) comprimento médio dos lineamentos.

Da análise do diagrama representado na alínea a) da figura 6-5, pode ver-se que o maior número de lineamentos se distribui em torno das direcções N65W (nº total de

lineamentos = 109), N30W (nº total de lineamentos = 63), N90E (nº total de lineamentos = 55), N70E (nº total de lineamentos = 45) e N30E (nº total de lineamentos = 24).

Por distribuição em torno de uma direcção deve entender-se, não só o número de lineamentos encontrados nessa direcção, mas também os que se situam numa faixa compreendida até 5° à direita e até 5° à esquerda daqueles.

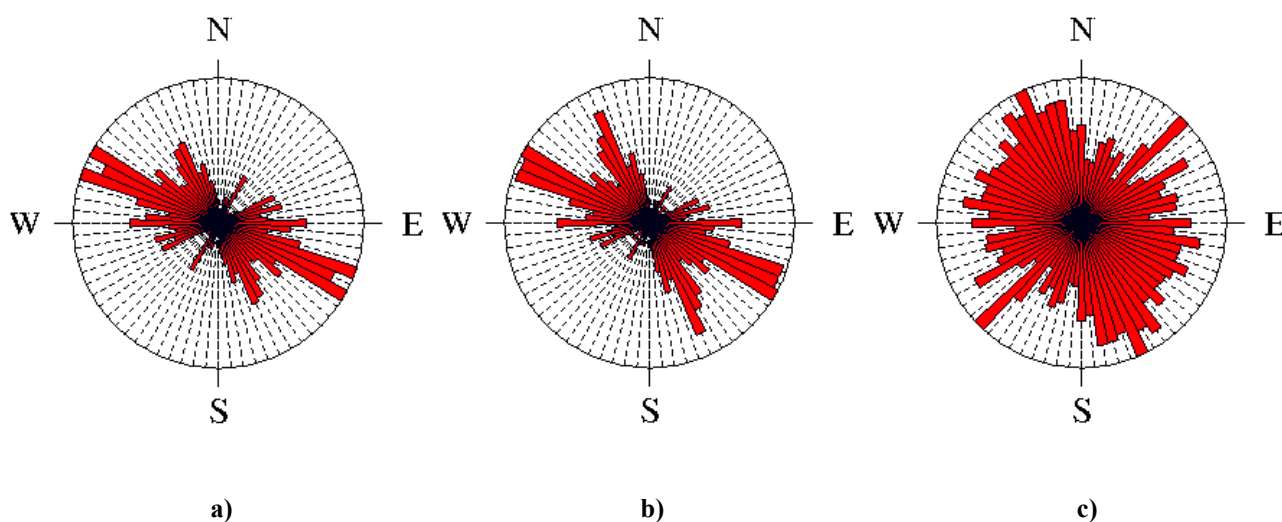


Figura 6-5 – Diagramas de rosa relativos ao mapa de lineamentos representado nas Figuras 6-2 e 6-4.
a) Número de lineamentos; b) Comprimento total dos lineamentos; c) Comprimento médio dos lineamentos; (ver também Tabela 6-1).

O diagrama representado na alínea b) da figura 6-5, reproduz o comprimento total de lineamentos e segue o padrão da figura anterior, uma vez que o comprimento total dos lineamentos que se distribuem em torno de determinada direcção, reflectem a soma dos comprimentos de todos os lineamentos nessa direcção, acrescida dos que se encontram até 5° à direita e até 5° à esquerda da mesma. Assim, o comprimento total dos lineamentos encontrados em torno das direcções N65W é de 29577.83 m, N30W é de 21.296.00 m, N90E é de 13080.66 m, N70E é de 10525.29 m e N30E é de 4516.69 m.

Finalmente, o diagrama representado na alínea c) da figura 6-5, descreve o comprimento médio dos lineamentos. Os maiores comprimentos médios dos lineamentos encontram-se nas direcções N45E (comprimento médio = 369.16 m) e N25W (comprimento médio = 367.64 m).

Com base nas campanhas de prospecção geofísica efectuadas, foi elaborada a carta de fracturação apresentada na Figura 5-5 do capítulo anterior. Será interessante comparar as estruturas assinaladas no mapa de lineamentos com as estruturas detectadas no campo através da prospecção geofísica.

A informação obtida através do cruzamento do mapa de lineamentos com a carta de fracturação sumária, bem como a coligida a partir de outros trabalhos, será reunida e aplicada ao estudo sobre a influência da tectónica recente na circulação fissural dos arredores de Castelejo.

6.1.2. Outros estudos de fracturação

Os estudos prévios com vista à caracterização da rede estrutural presente na vizinhança da mina de Castelejo, indicavam a existência de várias direcções de fracturação principais, as quais se reproduzem sinteticamente na Figura 6-6.

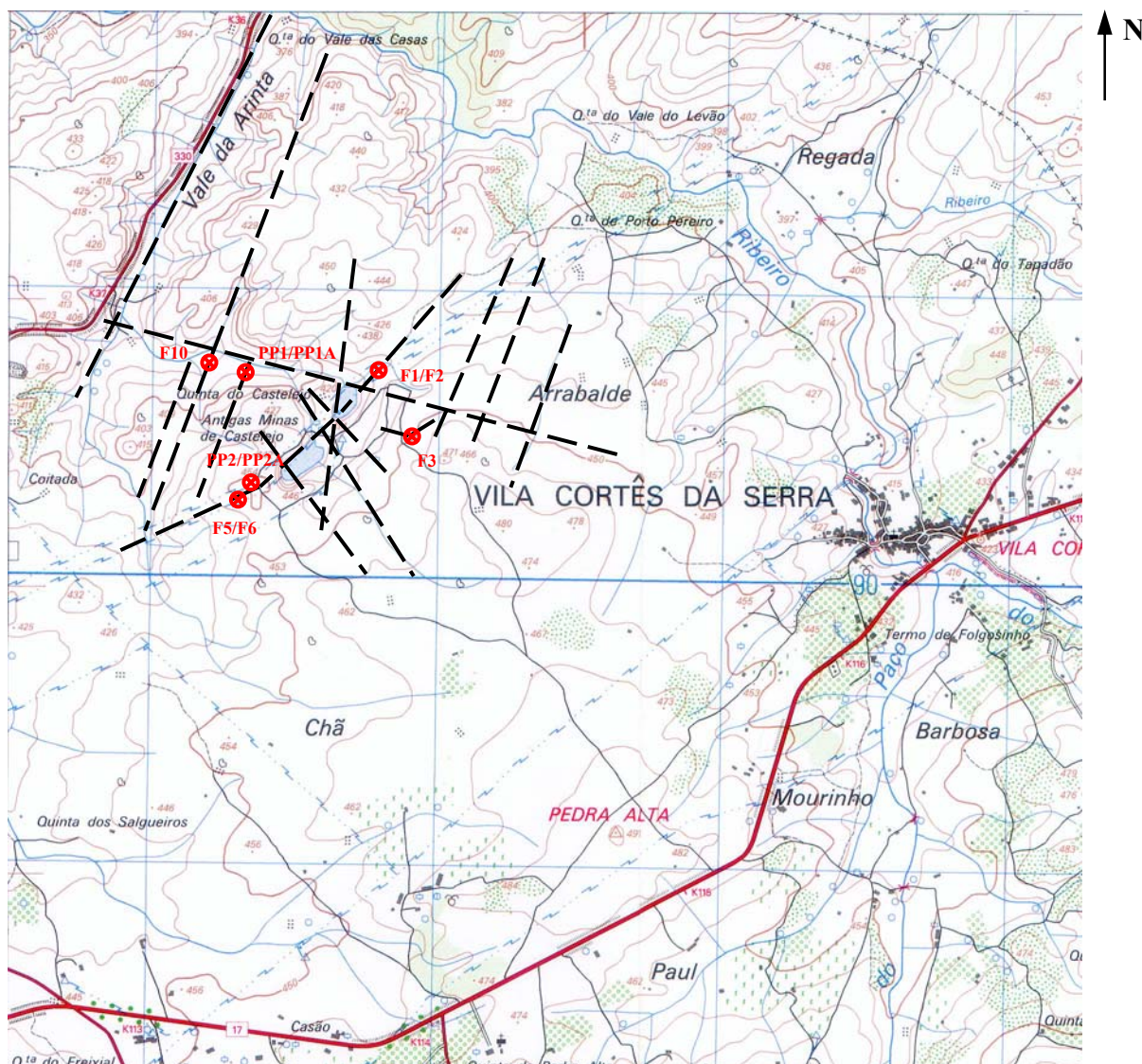


Figura 6-6 – Carta sumária de fracturação das imediações da mina de Castelejo.
(escala=1:25000, fracturas a tracejado, furos/piezómetros a encarnado).

Estas direcções materializam-se através das orientações seguintes:

- N55°-65°E; 50°-70°NW

Corresponde à direcção da estrutura explorada no Céu Aberto II. Trata-se de uma estrutura constituída por brecha granítica associada a quartzo, com grande alteração, proporcionando boas condições de permeabilidade.

Apresenta uma espessura variável, de 5 a 10 metros, sendo intersectada por diversos sistemas de fracturas, particularmente na transição entre Castelejo II e Castelejo I.

- N70°-75°W; 80°S

Falha presente no Céu Aberto II. Constituída por brecha granítica muito argilosa. Possui caixa com cerca de 1 metro.

- N20°-25°W; 80°S

Falha presente no Céu Aberto II. Constituída por brecha granítica muito argilosa, evidenciando os feldspatos alterações esverdeadas.

- N35°-45°E; 40°-70°NW

Corresponde à direcção da estrutura explorada no Céu Aberto I. Tal como no sistema anterior, trata-se de uma estrutura constituída por brecha granítica associada a quartzo, bastante alterada, proporcionando boas condições de permeabilidade.

Apresenta uma espessura que varia de 3 a 6 metros, sendo intersectada por diversos sistemas de fracturas, em particular na transição entre Castelejo I e Castelejo II.

- N70°-75°W; 70°N

Falha presente no Céu Aberto I e que materializa o vale de Castelejo. Tratando-se de zona estrutural encontra-se-lhe associada fracturação secundária.

- N25°-60°W; Sub-vertical

Sistema maioritariamente constituído por diaclases, que se relaciona com maior expressão com as duas direcções de mineralização anteriormente referidas, dando lugar a alterações da rocha, por vezes com alguma importância, por lixiviação natural.

Este sistema deverá direccionar as águas pluviais e de infiltração para o vale de Castelejo, situado aproximadamente 300 metros a Norte de ambos os Céus Abertos.

Para além das direcções de fracturação atrás referidas, existem ainda as seguintes direcções de diaclasamento, sem movimentação aparente ou com pequena movimentação e exibindo alguma abertura superficial:

- N75°E e N85°W; Sub-vertical
- N10°-25°E; Sub-vertical

São alinhamentos com intervalos da ordem do metro, sendo os acima indicados os mais frequentes.

Sintetizando, a estrutura regional mineralizada e originalmente objecto de exploração apresenta características – forte alteração e desagregação do material - que permitem supor tratar-se de um eixo de infiltração profunda.

As falhas N70°-75°W e N20°-25°W cortam a estrutura anterior, colectando e direccionando as águas pluviais e de infiltração para o vale de Castelejo.

De acordo com a maior ou menor abertura das diaclases presentes, assim as mesmas funcionarão, ou não, como transmissoras de água, quer em profundidade, quer dando lugar a exsurgências.

Parece ser através das direcções N70°-75°W e N20°E que se processa a recarga do sistema aquífero, podendo as mesmas descrever-se como zonas abatidas preenchidas com granito muito alterado.

Quanto à localização dos furos/piezómetros, os mesmos encontram-se distribuídos de acordo com a descrição seguinte:

- F1/F2, par piezométrico situado sobre a estrutura mineralizada (aproximadamente N60°E) a NE de Castelejo I (Céu Aberto I);
- F3, piezómetro situado sobre a intersecção das direcções N60°E e N75°W, 250 m a SE de Castelejo I;
- F5/F6, par piezométrico situado sobre a estrutura mineralizada (aproximadamente N60°E) a SW de Castelejo II (Céu Aberto II);
- F10, piezómetro situado sobre fractura de direcção N20°E, cerca de 500 m a NW de Castelejo II, antes do cruzamento com o vale de Castelejo;
- PP1/PP1A, par piezométrico situado sobre a intersecção das direcções N20°E e N75°W, cerca de 400 m a NW de Castelejo II;
- PP2/PP2A, par piezométrico situado sobre a direcção N60°E, a SW de Castelejo II;

6.2. A influência da tectónica recente na circulação fissural na mina de Castelejo

A teoria simplificada de *Anderson (1951)* baseada no critério de ruptura de Coulomb-Navier, considera as tensões de corte ou cisalhantes à superfície terrestre como nulas. Nestes termos, deverá uma das tensões principais ser normal (vertical) à superfície terrestre, sendo-lhe as duas restantes paralelas (horizontais), o que origina a ocorrência dos seguintes tipos de falhas:

- Falhas normais, se a tensão compressiva máxima (σ_1) for vertical;
- Falhas inversas, se a tensão compressiva mínima (σ_3) for vertical;
- Desligamentos, se a tensão compressiva média (σ_2) for vertical, situação que se ilustra na Figura 6-7;

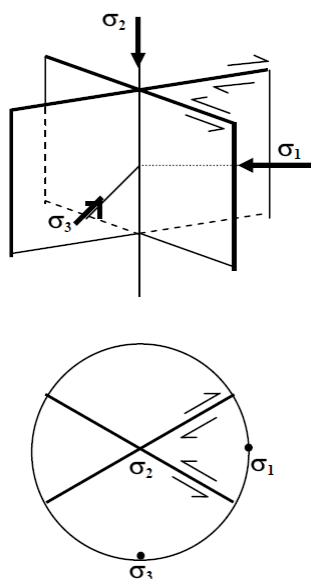


Figura 6-7 – Falha de desligamento, segundo *Anderson, 1951*.
Em baixo representa-se em projecção estereográfica (hemisfério inferior).

Como resultado da actuação dos campos de tensão de idade mais recente sobre as rochas, verifica-se a geração de novas estruturas frágeis ou suscita-se a reactivação de estruturas pré-existent. Os fenómenos referidos deverão desta forma controlar a magnitude de abertura das fracturas e, por isso, a circulação de água no meio fracturado (*Fernandes, 2001*).

A deformação frágil produz fracturação através de dois processos principais – extensão e cisalhamento. As fracturas de cisalhamento ocorrem normalmente como pares conjugados e as fracturas de extensão bissectam o ângulo agudo que as primeiras fazem entre si.

As fracturas de extensão orientam-se paralelamente à tensão compressiva máxima (σ_1) e perpendicularmente à tensão compressiva mínima (σ_3).

A Figura 6-8 ilustra o campo de tensões e a posição espacial das fracturas de extensão e cisalhamento (falhas) originadas por um regime tectónico de desligamento.

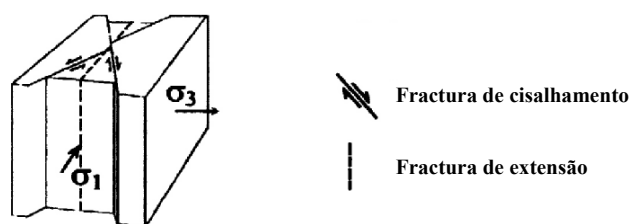


Figura 6-8 – Orientação da tensão e tipos de fracturas originadas por tectónica de desligamento.

Tanto as falhas como as fracturas de extensão são constituídos por planos verticais ou sub-verticais.

As fracturas de extensão tendem a exibir aberturas mais largas do que as exibidas pelas fracturas de cisalhamento, o que faz com que o escoamento da água subterrânea se processe preferencialmente ao longo das fracturas de extensão.

Uma vez que a circulação superficial e subsuperficial na zona em estudo é estruturalmente condicionada pela intensa fracturação existente na zona, impunha-se proceder à sua caracterização.

As trajectórias de tensão no território continental português no período neotectónico, ou seja, no período compreendido nos últimos 2 MA (isto é, desde o Pliocénico terminal até à actualidade) inferidas a partir de diversos dados de natureza geológica e geofísica, apontam no sentido de a tensão compressiva máxima horizontal (σ_1) se orientar no interior do território segundo NNW-SSE a NW-SE (*Cabral, 1985*).

Como consequência de um processo de reactivação da fracturação pré-existente por acção de um campo de tensões, pode dizer-se que as falhas activas se ordenam no território do continente de acordo com orientações Hercínicas. É, designadamente, o caso de falhas de desligamento originadas no decurso do primeiro episódio de fracturação tardi-Hercínica (*Ribeiro et al., 1979*) já abordadas no início do presente capítulo, afigurando-se usual que às falhas de desligamento, em especial às de maior expressão, para além da componente de movimentação horizontal, se associe igualmente alguma movimentação vertical, seja de carácter normal ou inverso.

Nestes termos, suportado nos estudos desenvolvidos, particularmente nos mapas e tabela de lineamentos antes apresentados, é possível elaborar um diagrama de rosa, com base no comprimento total dos lineamentos, ao qual se encontra sobreposto um diagrama sumário

contendo a orientação das fracturas de extensão e cisalhamento desenvolvidas no período neotectónico. (Figura 6-9).

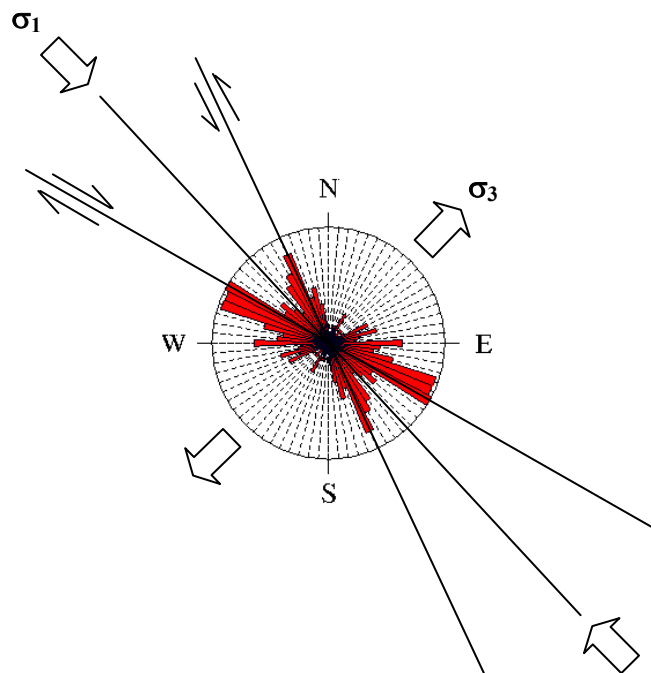


Figura 6-9 – Diagrama de rosa, relativo ao comprimento total dos lineamentos, com orientação das tensões principais e das fracturas de cisalhamento e extensão.

Deve notar-se a concordância existente entre o campo de tensões obtido a partir do traçado dos mapas de lineamentos e do inferido a partir dos estudos neotectónicos descritos em *Cabral, 1985*.

Da análise do diagrama da Figura 6-9 resulta que a direcção da tensão compressiva máxima, σ_1 , bissecta a fracturação conjugada originada por cisalhamento, e corresponde à direcção em que se desenvolvem fracturas de extensão, sendo perpendicular à tensão compressiva mínima, σ_3 .

A direcção de σ_1 , situada de NNW-SSE a NW-SE, em que se desenvolvem fracturas de extensão, deverá ser aquela em que a água subterrânea circula com mais facilidade, uma vez que as maiores aberturas das fracturas proporcionam um melhor escoamento.

7. Geomatemática

7.1. Introdução

Como foi referido anteriormente, entre 1979 e 1990 a exploração mineira ocorreu a partir de duas cortas a céu aberto.

A partir de 1992, porém, a produção passou a efectuar-se a partir da lixiviação de minérios pobres, provenientes tanto da própria mina do Castelejo, como de outras situadas nas imediações, para cujo efeito se utilizou uma das cortas anteriormente referidas.

Para além de uma bacia de decantação destinada à recolha e tratamento de efluentes situada no espaço afecto à área mineira, localizam-se actualmente nas cortas duas lagoas, correspondentes ao preenchimento dos antigos espaços de mineração pela água da chuva e reflectindo o nível freático local.

Na antiga corta assinalada na Figura 7-1 como Céu Aberto II (CIIA) teve lugar a lixiviação ácida do minério pobre, com vista à recolha dos licores enriquecidos em urânio.

Foi também referido que a entidade responsável pela exploração, a então Empresa Nacional de Urânio, monitoriza desde 1991 de uma forma mais ou menos regular diversos pontos de água situados nas proximidades da mina do Castelejo.

Note-se igualmente que os dados recolhidos são de difícil tratamento, uma vez que são desconhecidas as características geométricas dos piezómetros, bem como as profundidades de captação.

Por outro lado, o modelo conceptual seguido no presente trabalho, comum a grande parte das regiões graníticas, aponta no sentido de os dados recolhidos serem referentes a duas realidades distintas - furos e poços - sendo de supor que interessam aquíferos, ou zonas dentro de um mesmo aquífero, de características igualmente distintas. Assim, em termos ideais, teremos:

- um aquífero poroso, localizado na zona superficial de alteração dos granitos, considerado como aquífero livre, evidenciado pelas inúmeras zonas alagadas e captações superficiais detectadas no campo;
- e um aquífero fissurado, localizado sob o primeiro, em zona mais ou menos profunda de fracturação e alteração do maciço rochoso, interpretado como aquífero confinado.

7.2. Âmbito do estudo

Com vista à realização do estudo hidrogeológico do sítio mineiro em que o trabalho ora apresentado se inscreve, foram disponibilizados pela ENU os resultados das análises das amostras de águas recolhidas entre 1991 e 2005, nos diversos pontos de água seguidamente referidos.

Os pontos de água, num total de 14, são constituídos por 6 furos (F01, F02, F03, F05, F06 e F10), 5 poços (P01, P02, P03, P04 e P05), 2 cortas - Céu Aberto I (CIA) e Céu Aberto II (CIIA) - e Efluente lançado (Ef_L) e distribuem-se por uma área aproximada de 1 Km² - vide Figura 7-1.

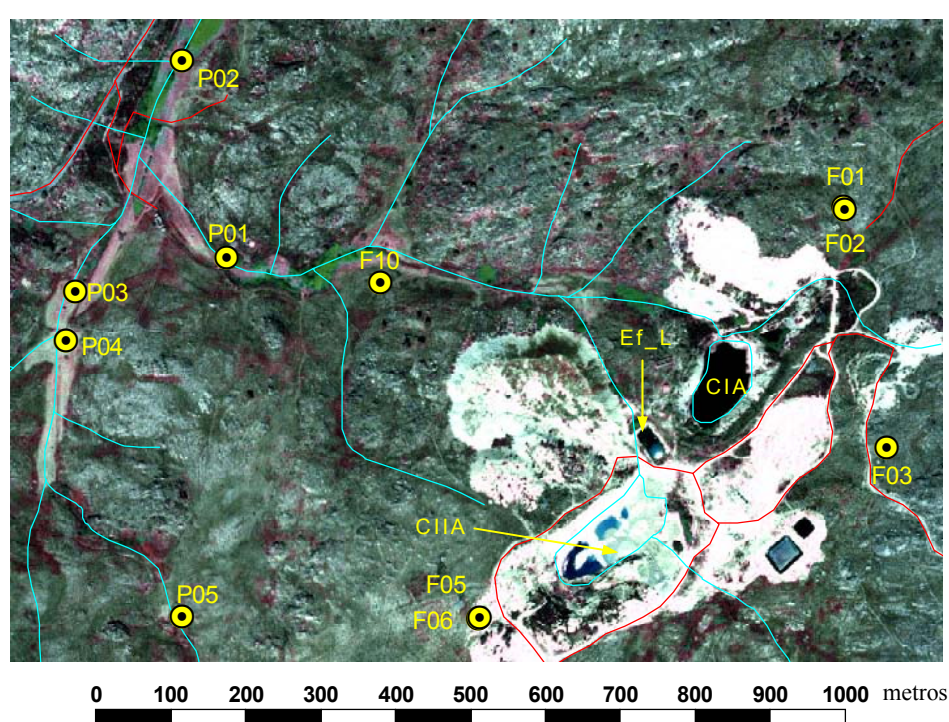


Figura 7-1 - Planta fotográfica da área em apreço.

Legenda: F-Furos, P-Poços. Rede viária, caminhos - vermelho; rede hidrográfica - azul.

(De notar a aparente sobreposição de F01/F02 e F05/F06, devida às curtas distâncias que os separam).

As variáveis analisadas, num total de 13, são as seguintes:

- pH;
- Temperatura (°C);
- Condutividade Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$);
- U_3O_8 (ppm);
- SO_4 (ppm);
- Fe (ppm);
- Ca (ppm);
- Ba (ppm);
- K (ppm);
- Mn (ppm);
- Na (ppm);
- Cl (ppm);
- Ra (Bq/l);

Neste trabalho utiliza-se uma técnica de Análise de Dados, a Análise em Componentes Principais (ACP), visando obter para os dois conjuntos de anos hidrológicos estabelecidos (1991-2001 e 2002-2005) um esboço da distribuição espacial das variáveis analisadas.

7.3. Completamento dos dados

Ao levar a cabo estudos de séries temporais, o autor confronta-se quase sempre com a grande irregularidade por aquelas patenteada, quer seja pela falta de dados, quer pela sua não simultaneidade.

No presente caso, a irregularidade dos dados de partida manifestava-se, quer através de grandes espaçamentos temporais entre colheitas (ou também, e pelo contrário, através de grande concentração de amostragens em curtos espaços de tempo) quer pelo facto de, na maior parte dos casos, não serem analisados todos os elementos em simultâneo, para além da falta de análises de alguns elementos maiores. Mas a grande dificuldade na obtenção de dados que se pretendiam representativos das populações estudadas, residia sobretudo no facto daqueles se encontrarem substancialmente truncados ou censurados, isto é, reportados como não detectados – “non detects”, “less thans” ou “below detection limit” (*Farnham et. al, 2002*).

Era conhecido que, a partir de 2002, as análises de águas passaram a ser feitas num laboratório distinto daquele que a elas procedeu até essa data. Esta mudança de laboratórios teve consequências, tanto a nível dos métodos de análise utilizados, como quanto aos limites de detecção, que sofreram alterações a partir de 2002.

Desta forma, foram efectuadas duas ACP's, - sobre os dados relativos aos períodos 1991-2001 e 2002-2005 – para o que foram construídos dois ficheiros de partida. Cada ficheiro foi construído com base nas médias de cada variável em cada local, no decurso do período considerado. Havia, no entanto, que atribuir um valor a todas as variáveis que incorporassem dados censurados. Algumas variáveis encontravam-se completamente censuradas, possuindo outras valores abaixo de mais do que um limite de detecção.

Assim, com vista ao completamento das variáveis completamente censuradas foi utilizada uma técnica de regressão múltipla, enquanto que relativamente às variáveis censuradas ou multi-censuradas (com valores abaixo de mais do que um limite de detecção) foi utilizado o método gráfico de probabilidade, cujas bases abaixo se expõem (*USGS, Mdlwin, 2000*).

7.3.1. Método gráfico de probabilidade

O método gráfico de probabilidade baseia-se no método da regressão estatística ordenada, considerando múltiplos limites de detecção (*Helsel, 1987; Singh & Nocerino, 2001; USGS, 2004; Helsel, 2006*). O algoritmo pode descrever-se nos passos seguintes:

- Separação das observações em dois grupos - valores não detectados e valores detectados;

sendo:

m = nº de diferentes limites de detecção;

A_j = nº de observações detectadas acima do j -ésimo limite de detecção ($j = 1, \dots, m$) e abaixo do limite de detecção imediatamente superior;

B_j = nº de observações detectadas e não detectadas abaixo do j -ésimo limite de detecção ($j = 1, \dots, m$);

$p_{e,j} = p_{e,j+1} + (A_j / [A_j + B_j])(1 - p_{e,j+1})$, e resolver iterativamente para $j = m, m-1, \dots, 2, 1$. Por convenção, $p_{e,m+1} = 0$.

- Determinação de posições de projecção para as observações detectadas, $p(i)$, de acordo com $p(i) = (1 - p_{e,j}) + (p_{e,j} - p_{e,j+1}) \cdot r / (A_j + 1)$, onde r é o ordenamento da i -ésima observação acima do j -ésimo limite de detecção.

- Atribuição de posições de projecção às observações não detectadas, $pc(i)$, de acordo com $pc(i) = (1 - p_{e,j}) \cdot r / (C_j + 1)$, onde $r = 1, \dots, C_j$. C_j é o número de valores não detectados de que apenas se sabe serem menores do que o j -ésimo limite de detecção.

- Efectuar uma regressão linear simples utilizando apenas as observações detectadas. O logaritmo natural das observações detectadas ($z_i = \ln(y_i)$) é a variável dependente e o quantil normal associado com a posição de projecção correspondente ($\Phi^{-1}(p(i))$) é a variável independente.

- Utilizar a recta de regressão estimada ($\hat{z}_i = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 \cdot \Phi^{-1}(pc(i))$) a fim de preencher valores estimados de logaritmos naturais para as observações não detectadas, baseados nos quantis normais associados com as posições de projecção calculadas, $pc(i)$.

- Calcular uma média do logaritmo natural ($\hat{\mu}$) e um desvio-padrão do logaritmo ($\hat{\sigma}$) de todas as observações (detectadas + preenchidas) utilizando as fórmulas que se seguem:

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \quad (\text{Eq. 7-1})$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n-1}} \quad (\text{Eq. 7-2})$$

Embora o método de determinação das posições de projecção, no caso de existirem vários limites de detecção, pareça algo pesado, o processo de ajustamento de uma recta de regressão a estatísticas ordenadas encontra-se bem estabelecido como método de determinação de parâmetros de uma distribuição.

O método da regressão estatística ordenada utiliza as posições de projecção para espalhar as observações não detectadas, em vez de simplesmente atribuir um valor arbitrário a cada observação não detectada.

O método gráfico de probabilidade acima descrito, ainda que com ligeiras adaptações, é semelhante ao método de Helsel e Cohn (Helsel and Cohn, 1988).

São necessárias pelo menos duas observações com vista à estimação de uma recta de regressão, pelo que este procedimento não é útil quando exista apenas uma, ou não existam observações detectadas.

7.3.2. Regressão linear múltipla

A regressão linear simples baseia-se nas relações entre duas variáveis - uma variável dependente e uma variável independente. O método mais comum conduz à equação da recta

$$y = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i \text{ (Eq. 7-3)}$$

sendo α e β constantes e ε_i o erro, ou seja, a variabilidade em y não explicada por x .

Quanto menor o erro, ε_i , melhor o modelo estabelecido explicará a relação entre as duas variáveis.

Quando ε_i assume uma magnitude tal que é superior à explicação proporcionada pela variável independente, outras variáveis devem ser introduzidas no modelo, a fim de melhor explicar o comportamento da variável dependente. Encontramo-nos agora no domínio da regressão linear múltipla, cujo modelo geral é dado pela equação 7-4:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_{1i} + \dots + \alpha_m x_{mi} + \varepsilon_i \text{ (Eq. 7-4)}$$

Uma das mais importantes aplicações da regressão múltipla é a escolha, entre diversas variáveis independentes, das mais eficazes na explicação do comportamento da variável dependente.

Embora sejam possíveis diferentes abordagens, um dos métodos mais utilizados é o da regressão passo a passo, tanto progressiva, como regressiva “*forward stepwise regression*” ou “*backward stepwise regression*” (Williams, 2004).

A regressão progressiva ou com adição de variáveis, selecciona, passo a passo, do grupo de variáveis independentes, aquela que mais contribui para o coeficiente de determinação, R^2 . A análise termina quando mais nenhuma variável independente for admitida no modelo, pelo facto da sua contribuição não ser estatisticamente significativa a determinado nível, previamente definido.

A regressão regressiva ou com remoção de variáveis, funciona de modo inverso ao da regressão progressiva. As variáveis independentes vão sendo removidas até que todas sejam estatisticamente significativas a determinado nível, previamente definido.

Com vista ao completamento das variáveis analisadas neste estudo, foi utilizado o método de regressão progressiva.

Após o preenchimento das lacunas inicialmente identificadas foram obtidas 2 matrizes (uma relativa ao período 1991-2001 e outra referente ao período 2002-2005, vd. Tabelas 7-1 e 7-2) de dimensões 14 x 13 (14 localizações x 13 variáveis).

De referir que, da matriz relativa aos anos 1991 a 2001, constam duas localizações (Bacia de decantação e Efluente tratado) que foram eliminadas da matriz inicial da ACP, tendo apenas sido utilizadas na estimação por regressão linear da variável Ra.

Irá agora passar-se em breve revista o fundamento teórico da metodologia utilizada.

1991-2001	pH	Conduct. (mS/cm)	Temp (°C)	Ca (ppm)	Mn (ppm)	Na (ppm)	U ₃ O ₈ (ppm)	²²⁶ Ra (Bq/l)	K (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ ⁻² (mg/l)	Ba (ppm)	Fe (ppm)
B.decantação	9,79	2588,62	16,55	407,37	4,37	16,83	0,56	0,60	4,53	41,94	863,00	0,26	0,18
CIA	7,65	321,68	13,82	18,58	0,96	12,61	0,70	1,28	2,02	24,21	73,71	0,22	0,23
CIIA	4,48	2063,19	16,57	168,97	18,20	14,32	2,61	4,55	3,50	46,53	717,20	0,12	3,62
Ef. lançado	8,37	613,17	12,73	408,60	2,52	39,55	0,80	0,88	10,39	33,20	1051,00	0,53	0,42
Ef. tratado	9,90	2663,20	16,74	367,67	2,46	15,02	0,47	0,60	3,68	47,92	702,90	0,23	0,16
Furo 1	6,91	432,14	16,28	10,84	0,35	24,94	0,50	0,14	2,34	32,04	85,00	0,10	0,35
Furo 10	6,19	208,02	16,44	2,14	0,25	13,20	0,26	0,30	0,70	9,46	53,03	0,24	0,43
Furo 2	7,06	263,08	16,32	9,88	0,32	19,77	0,41	0,15	3,30	29,57	80,66	0,11	0,31
Furo 3	6,75	255,11	16,75	6,32	0,24	9,30	0,51	0,17	2,58	17,57	57,05	0,12	0,39
Furo 5	6,54	242,72	16,91	2,72	0,16	12,25	0,48	0,22	0,98	22,87	67,78	0,14	0,50
Furo 6	6,49	246,79	16,76	3,17	0,27	12,62	0,47	0,15	0,83	22,84	68,77	0,18	1,27
Poço 1	5,54	422,54	14,30	23,61	0,57	11,13	0,30	0,14	0,65	44,42	86,51	0,12	0,19
Poço 2	5,60	366,63	14,06	16,73	0,38	7,27	0,33	0,12	0,28	32,05	29,65	0,18	0,20
Poço 3	5,79	85,15	14,14	1,79	0,36	4,99	0,21	0,23	0,31	25,42	20,49	0,16	0,46
Poço 4	5,82	83,36	13,85	1,56	0,25	5,26	0,47	0,16	0,14	24,08	25,84	0,19	0,23
Poço 5	5,92	85,87	14,02	0,88	0,22	4,90	0,41	0,13	0,28	14,78	17,05	0,19	0,20

Tabela 7-1 – Matriz inicial completa para ACP.

Estimação obtida através do método robusto de Helsel;

Estimação obtida por regressão linear;

Equação de regressão (estimadores CIIA (Efluente não tratado), Efluente tratado e Bacia de Decantação):

$$Ra = 1.1438 Fe + 0.405086117$$

Equação de regressão (estimadores Poço 1, Poço 2, Poço 3, Poço 4, Furo 10 e CIA):

$$SO_4 = -414.7521 (1/Na) + 101.6341$$

2002-2005	pH	Condut	Temp	Cl	Ca	SO4	Fe	Mn	Ra	K	Utot	Na	Ba
CIIA	5,34	335,85	10,38	22,67	47,20	182,87	0,91	1,47	0,93	0,77	55,72	5,97	0,16
Ef. lançado	7,03	300,93	9,74	22,63	38,51	128,13	0,14	0,53	0,07	0,33	9,50	4,31	0,31
Furo 1	6,57	208,36	13,96	25,32	6,82	3,62	0,18	0,30	0,12	0,75	8,70	20,56	0,11
Furo 10	6,33	101,29	14,36	15,69	3,81	1,46	0,20	0,29	0,07	0,51	3,27	11,35	0,09
Furo 2	6,81	187,20	13,71	24,70	10,47	2,14	0,12	0,19	0,03	0,85	2,83	17,84	0,11
Furo 3	6,71	182,78	14,69	17,24	13,08	7,79	0,13	0,30	0,06	4,23	3,80	5,34	0,12
Furo 5	6,13	77,70	15,23	17,13	1,24	1,57	0,06	0,24	0,03	0,45	1,20	9,22	0,11
Furo 6	6,09	82,99	15,14	18,97	1,34	2,16	0,05	0,26	0,04	0,46	1,20	9,23	0,08
Poço 1	5,77	82,91	13,58	18,26	4,76	23,91	0,04	0,20	0,03	0,15	0,90	6,41	0,07
Poço 2	5,78	85,57	13,28	16,13	4,60	22,34	0,06	0,20	0,03	0,21	1,12	6,94	0,11
Poço 3	5,88	41,43	12,94	11,96	0,61	0,68	0,03	0,23	0,02	0,05	1,47	6,67	0,09
Poço 4	5,93	42,29	13,10	22,72	0,89	2,44	0,06	0,29	0,03	0,05	0,81	4,52	0,06
Poço 5	6,14	35,99	13,36	13,20	0,44	1,33	0,05	0,25	0,03	0,11	1,11	3,75	0,10
CIA	6,29	279,50	13,75	4,19	6,65	19,66	0,08	0,06	0,04	0,16	1,72	3,77	0,14

Tabela 7-2 – Matriz inicial completa para ACP.

Estimação obtida através do método robusto de Helsel;

Estimação obtida por regressão linear;

Equações de regressão (estimadores Poço 1, Poço 2, Poço 3, Poço 4 e Poço 5):

$$\text{Na} = -9.73139 \text{ pH} - 0.15425 \text{ Cl} + 65.62244$$

$$\text{U}_{\text{tot}} = -0.05241 \text{ Cl} + 1.944463$$

$$\text{K} = 0.004966 \text{ SO}_4 + 0.066138$$

$$\text{Ba} = -0.00439 \text{ Cl} + 0.157979$$

7.4. Fundamentos da Análise em Componentes Principais

A Análise em Componentes Principais é uma técnica de análise multivariada de dados em que os *componentes principais* são os **vectores próprios** (*eigenvectors*), também interpretados como *factores*, de uma matriz de variância-covariância, ou de uma matriz de correlação (Pereira, 1990). O objectivo da ACP é encontrar estes *factores* e quantificar as suas magnitudes, dadas através dos **valores próprios** (*eigenvalues*) da matriz considerada.

Utilizá-la-emos porque se aplica a dados quantitativos (que são os de que dispomos) não fazendo qualquer exigência relativamente à distribuição das variáveis iniciais, e permite reduzir as dimensões do espaço inicial, dado pela matriz de partida de $n=14$ linhas por $p=13$ colunas. É considerada, desta forma, a matriz como uma nuvem de 14 pontos em \mathbf{R}^{13} , ou como uma nuvem de 13 pontos em \mathbf{R}^{14} que interessa reduzir, a fim de que seja possível tornar interpretáveis as relações entre os indivíduos e as propriedades, que não são perceptíveis na fase actual.

A análise inicia-se em \mathbf{R}^p , sujeitando a Matriz de Partida, $[\mathbf{X}]$, de $n=14$ linhas x $p=13$ colunas, e elemento genérico x_{ij} , a uma operação de ‘scaling’, através da qual se pretende obter uma nova matriz, $[\mathbf{Y}]$, de elemento genérico y_{ij} , tal que

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j \sqrt{n}} \quad (\text{Eq. 7-5})$$

A matriz de partida é submetida a este ‘scaling’ de correlação e não ao ‘scaling’ de variância-covariância, uma vez que as variáveis que nos encontramos a analisar são de naturezas diferentes. Esta nova matriz, $[\mathbf{Y}]$, assim obtida, tem igualmente dimensões $n=14$ x $p=13$. Transpondo agora $[\mathbf{Y}]$, vamos obter $[\mathbf{Y}]'$, de elemento genérico y_{ji} , com dimensões $p=13$ x $n=14$.

Pré-multiplicando $[\mathbf{Y}]$ por $[\mathbf{Y}]'$, obteremos a *menor matriz produto de $[\mathbf{Y}]$* , ou seja, uma matriz quadrada simétrica com dimensões $p=13$ x $p=13$, designada de matriz de correlação, $[\mathbf{C}]$.

A matriz de correlação, $[\mathbf{C}]$, de elemento genérico c_{ji} , tem como atributos possuir a diagonal principal constituída por $p=13$ valores iguais a 1, apresentando os elementos não diagonais os coeficientes de correlação entre as variáveis que se cruzam naquele local.

Assim, de uma matriz de partida de n linhas x p colunas de variáveis, extrai-se uma matriz de variância-covariância ou de correlação de dimensões p x p .

Associadas a qualquer matriz quadrada, encontram-se duas grandezas que analisaremos de seguida - os vectores próprios (*eigenvectors*) e os valores próprios (*eigenvalues*).

Atentando na equação

$$[\mathbf{C}].[\mathbf{X}]=\lambda[\mathbf{X}] \quad (\text{Eq. 7-6})$$

vemos que ela expressa que a matriz dos coeficientes $[\mathbf{C}]$, vezes uma matriz de incógnitas $[\mathbf{X}]$, é igual a uma constante λ , vezes essa matriz de incógnitas. Rescrevendo-a na forma

$$([\mathbf{C}]-\lambda[\mathbf{I}]).[\mathbf{X}]=[\mathbf{0}] \quad (\text{Eq. 7-7})$$

a sua solução, admitindo que $[\mathbf{X}]$ é diferente de zero, terá que ser

$$\det([\mathbf{C}]-\lambda[\mathbf{I}])=0 \quad (\text{Eq. 7-8})$$

Isto produz uma equação polinomial em λ que, numa matriz de dimensões $p \times p$, será do p -ésimo grau, e terá p soluções. Estas soluções são os **valores próprios** da matriz $[C]$.

Em seguida, substituímos cada valor próprio na matriz $([C]-\lambda[I])$,

$$\begin{bmatrix} c_{11} - \lambda_i & c_{12} & \dots & c_{1p} \\ c_{21} & c_{22} - \lambda_i & \dots & c_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{p1} & c_{p2} & \dots & c_{pp} - \lambda_i \end{bmatrix} \quad \text{com } i = 1 \rightarrow p$$

e recorrendo a técnicas de inversão de matrizes obtemos os **vectores próprios**. Como existem p valores próprios serão feitas nesta matriz p substituições, que produzirão p vectores próprios.

As linhas de uma matriz podem ser entendidas como uma série de vectores num espaço α -dimensional que definem eixos arbitrários de um elipsóide igualmente α -dimensional, cujo centro se encontra na origem do sistema de coordenadas.

Os **vectores próprios** podem tomar-se como definindo as orientações dos eixos principais desse elipsóide. Associados aos **vectores próprios** encontram-se os **valores próprios** (*eigenvalues*) que representam as magnitudes de cada um dos semi-eixos principais.

Do facto de, tanto a matriz de variância-covariância como a matriz de correlação serem simétricas, decorre, por um lado, que os **vectores próprios** são mutuamente ortogonais e, por outro lado, que os **valores próprios** são reais.

Já que a soma dos **valores próprios** é sempre igual à soma dos elementos diagonais da matriz, e os **valores próprios** representam as medidas dos semi-eixos principais, os eixos representarão a variância total (ou inércia total, já que estamos a trabalhar com uma matriz de correlação) da série de dados, contribuindo cada um para uma quantidade da inércia total correspondente ao **valor próprio** a dividir pela soma dos elementos diagonais.

É esta propriedade que vai permitir reter os eixos significativos relativamente à percentagem de explicação do fenómeno em estudo, por forma a que dele seja conseguida uma visualização perceptível.

Fazendo uma transformação do tipo:

$$\begin{aligned} V_1 &= a_1 X_1 + \dots + a_i X_i + \dots + a_p X_p \\ V_2 &= b_1 X_1 + \dots + b_i X_i + \dots + b_p X_p \\ &\vdots \\ V_p &= w_1 X_1 + \dots + w_i X_i + \dots + w_p X_p, \end{aligned}$$

em que V_1, V_2, \dots, V_p , representam os novos valores obtidos através da transformação, os coeficientes a_i representam os elementos do primeiro vector próprio, b_i os elementos do segundo vector próprio e w_i os elementos do p -ésimo vector próprio, e X_i representam as p variáveis (em observações originais no caso da matriz de variância-covariância, ou padronizadas no caso da matriz de correlação), obteremos uma nova série de dados, com inércias exactamente iguais aos correspondentes valores próprios.

Então, utilizando os elementos do 1º vector próprio, a variância será igual ao 1º valor próprio, utilizando os elementos do 2º vector próprio, a variância será igual ao 2º valor próprio, e assim sucessivamente até ao p-ésimo vector próprio, o que produzirá uma variância igual ao do p-ésimo valor próprio.

Cada observação foi assim convertida numa *pontuação do componente principal*, projectando-a nos eixos principais. Os elementos dos vectores próprios usados nestes cálculos designam-se por *pesos dos componentes principais*.

Embora o algoritmo empregue no presente trabalho (derivado da Escola Francesa de Benzécri) seja algo diferente do acabado de expor (Escola Anglo-Saxónica), o que atrás ficou dito sintetiza os diversos passos do método.

Para a concretização das análises, foi utilizado o *software* ANDAD (CVRM/IST, 1989-2002), que efectua a ACP aos indivíduos e às propriedades, e permite que o ‘output’ gráfico final seja o mesmo.

Do algoritmo resulta que o *output* gráfico final representa um círculo de raio unitário, pelo que as propriedades - interpretadas em termos de correlações - têm que se encontrar projectadas no seu interior, enquanto que os indivíduos, não estando sujeitos a este constrangimento, apenas são tomados como sendo atraídos por aquelas.

A interpretação dos eixos é feita através das variáveis, tendo em atenção que, quanto mais afastada estiver uma variável do centro do círculo, mais exacta será a sua representação no plano factorial, e que, quanto mais próxima estiver uma variável de um eixo, mais este se correlaciona com ela.

7.5. Resultados obtidos

Apresentam-se em seguida os resultados da ACP relativos a cada um dos dois períodos considerados (Tabelas 7-3 a 7-6 e Figuras 7-2 e 7-3).

Para cada análise foi considerada suficientemente elucidativa a explicação obtida apenas com recurso aos factores 1, 2, 3 e 4, tendo sido elaborados diferentes gráficos que os relacionam de forma diversa (eixos 1 e 2, eixos 1 e 3, eixos 1 e 4, eixos 2 e 3, eixos 2 e 4, eixos 3 e 4).

1991-2001	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3	Eixo 4
pH	0,115	0,852	0,371	0,037
Cond	-0,931	-0,341	0,019	0,052
Temp	-0,005	-0,527	0,828	0,038
Ca	-0,762	0,618	-0,098	-0,052
Mn	-0,896	-0,425	-0,033	-0,1
Na	-0,51	0,714	0,347	0,264
U3O8	-0,91	-0,352	0,039	-0,116
Ra	-0,888	-0,361	-0,035	-0,161
K	-0,65	0,716	0,175	0,057
Cl	-0,652	-0,135	-0,299	0,676
SO4	-0,884	0,441	-0,031	-0,062
Ba	-0,303	0,849	-0,185	-0,343
Fe	-0,804	-0,521	0,133	-0,149

Tabela 7-3 – Resultados da ACP – Coordenadas das variáveis nos 4 primeiros eixos.

Pode ver-se que:

1. No período compreendido entre 1991 e 2001 a percentagem de explicação associada aos 4 primeiros eixos é de 96.44 % da variabilidade total do fenómeno, sendo que o Eixo 1 contribui com 50.05 %, o Eixo 2 com 32.05 %, o Eixo 3 com 8.71 % e o Eixo 4 com 5.63 %.

Neste período (vd. Tabelas 7-3 e 7-4 e Figura 7-2) as variáveis parecem agrupar-se aproximadamente de acordo com o seguinte padrão:

- Condutividade, Ca, Mn, U₃O₈, Ra, SO₄ e Fe, associadas ao semi-eixo negativo do Eixo 1 – Grupo A;
- pH, Na, K, Ba, associadas ao semi-eixo positivo do Eixo 2 - Grupo B;
- Temperatura, isolada, associada ao semi-eixo positivo do Eixo 3 - Grupo C;
- Cl, isolada, associada ao semi-eixo positivo do Eixo 4 - Grupo D;

Para além das tendências atrás enunciadas, uma observação cuidada da Tabela 7-3 permite reconhecer que a variável Ca (grupo A) é igualmente atraída pelo Grupo B, que as variáveis Na e K (Grupo B) são atraídas pelo Grupo A, que a variável Temperatura (grupo C) é moderadamente atraída pelo semi-eixo negativo do Eixo 2 e que a variável Cl (Grupo D) é atraída com igual intensidade pelo Grupo A.

Da análise da Tabela 7-4 e da Figura 7-2, verifica-se igualmente uma marcada tendência de oposição entre furos e poços, facto que vem confirmar a concepção inicial da existência de dois aquíferos na região em estudo.

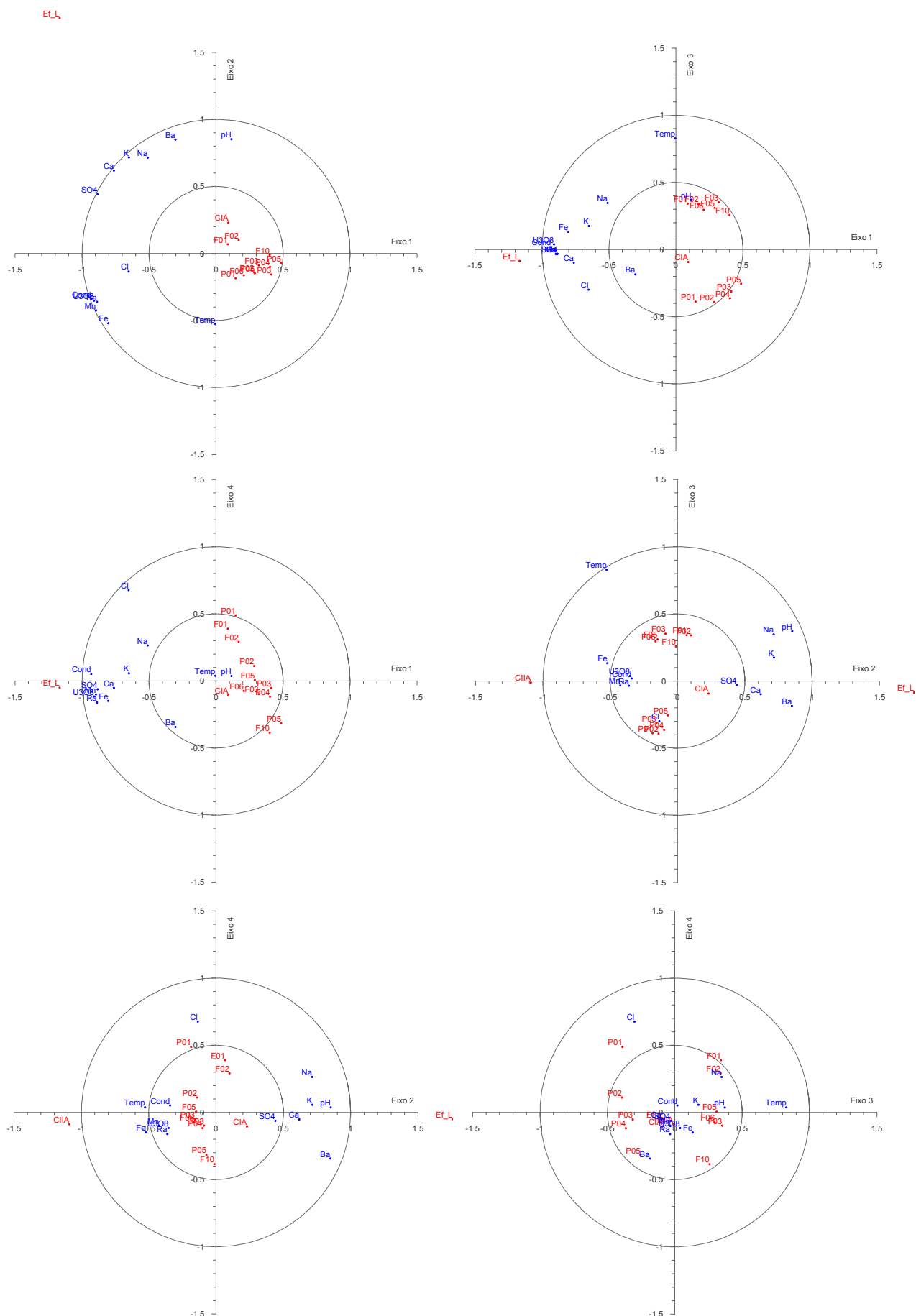
1991-2001	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3	Eixo 4
CIA	0,092	0,23	-0,093	-0,105
CHIA	-2,131	-1,089	-0,011	-0,088
Ef_L	-1,167	1,756	-0,085	-0,05
F01	0,088	0,068	0,342	0,389
F10	0,4	-0,012	0,258	-0,385
F02	0,169	0,1	0,34	0,291
F03	0,319	-0,089	0,352	-0,098
F05	0,289	-0,148	0,31	0,006
F06	0,207	-0,163	0,296	-0,074
P01	0,146	-0,185	-0,388	0,488
P02	0,285	-0,141	-0,391	0,111
P03	0,413	-0,157	-0,312	-0,052
P04	0,403	-0,1	-0,363	-0,117
P05	0,486	-0,071	-0,255	-0,316

Tabela 7-4 – Resultados da ACP – Coordenadas dos indivíduos nos 4 primeiros eixos.

Assim:

- O Eixo 2 discrimina os Céus Abertos e o Efluente Lançado: o Céu Aberto I (CIA) e o Efluente Lançado (Ef_L) situam-se no semi-eixo positivo, enquanto que o Céu Aberto II (CHIA) se situa no semi-eixo negativo;

- O Eixo 3 diferencia os furos dos poços: os furos encontram-se associados ao semi-eixo positivo, encontrando-se os poços associados ao semi-eixo negativo;



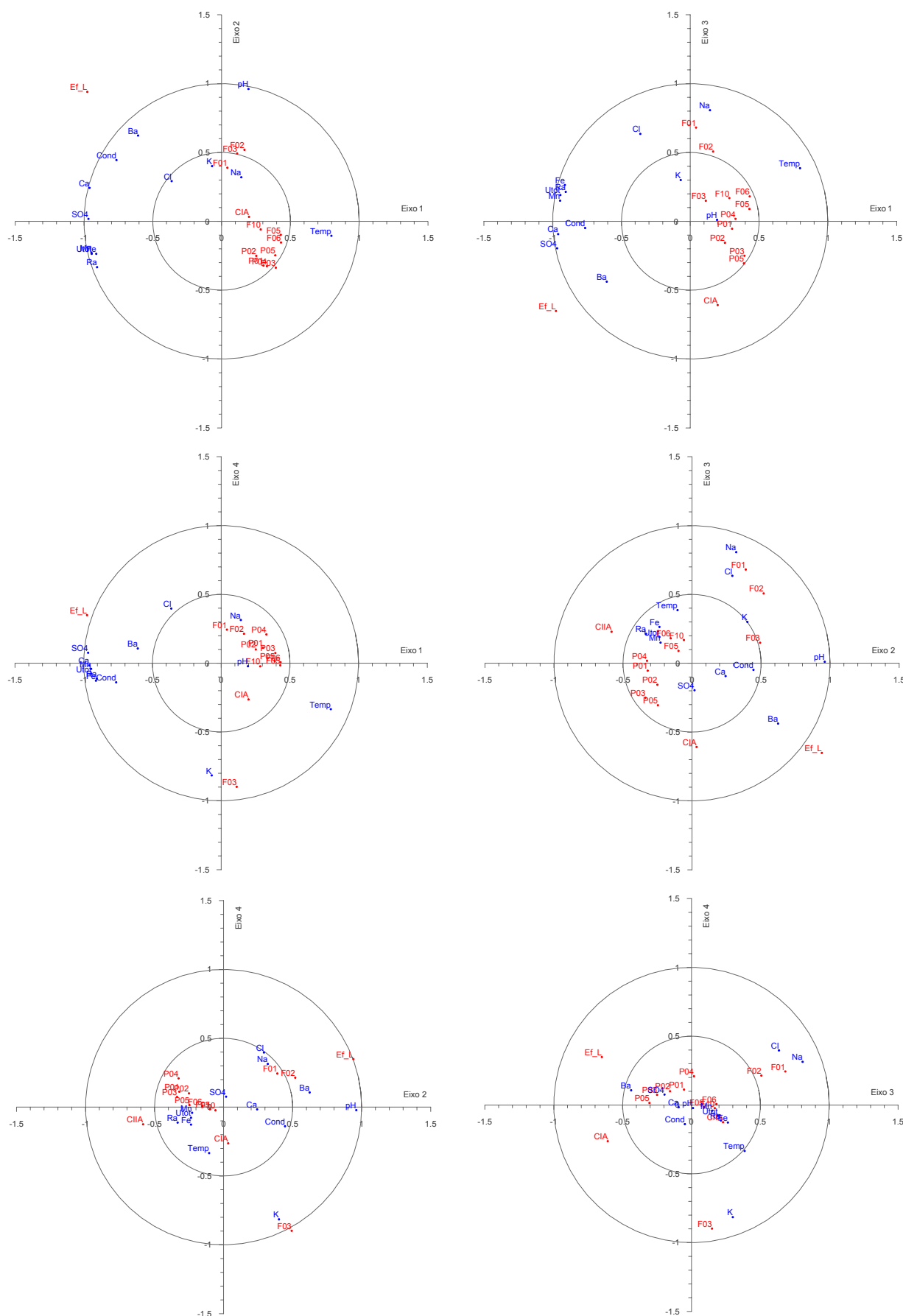


Figura 7-3 - Análise em Componentes Principais – anos de 2002 a 2005.
(Percentagem de explicação associada aos 4 primeiros eixos = 93.06 %).

As variáveis do Grupo A - Condutividade, Ca, Mn, U_3O_8 , Ra, SO_4 e Fe - associadas ao semi-eixo negativo do Eixo 1, traduzem a radioactividade existente na antiga exploração mineira – reflectem ambiente de mina e a presença do granito ou do filão de quartzo mineralizado em urânio.

Parecem igualmente evidenciar a presença de minerais ferromagnesianos dos granitos (e.g. biotite) bem como as operações de tratamento efectuadas, quer com ácido sulfúrico (utilizado para lixiviação do minério pobre e posterior recolha de licores) quer com leite de cal (hidróxido de cálcio, $Ca(OH)_2$, utilizado com vista à neutralização do pH das águas residuais).

A presença de Mn salienta a adsorção de rádio por parte do hidróxido daquele elemento.

As variáveis do Grupo B - pH, Na, K, Ba, associadas ao semi-eixo positivo do Eixo 2, revelam a dissolução dos feldspatos e minerais ferromagnesianos dos granitos (Na, K), enquanto que a associação pH/Ba evidencia a influência do pH no tratamento de efluentes com cloreto de bário.

Este processo de tratamento de efluentes traduz-se, após neutralização prévia do pH, pela adição de cloreto de bário, formando sulfato de bário, o qual precipita. O Ra substitui depois o Ba, co-precipitando como $Ba(Ra)SO_4$.

A variável do Grupo C - Temperatura, isolada, associada ao semi-eixo positivo do Eixo 3, sem explicação definida, uma vez que a Temperatura se associa a diversos processos químicos;

A variável do Grupo D - Cl, isolada, ligada ao semi-eixo positivo do Eixo 4, poderá encontrar-se ligada à presença de apatite, $Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$ ou também ao tratamento com adição de cloreto de bário.

2. No período compreendido entre 2002 e 2005, a percentagem de explicação associada aos 4 primeiros eixos é de 93.06 % da variabilidade total do fenómeno, sendo que o Eixo 1 contribui com 54.45 %, o Eixo 2 com 16.94 %, o Eixo 3 com 13.16 % e o Eixo 4 com 8.51 %. Neste período (vd. Tabelas 7-5 e 7-6 e Figura 7-3) as variáveis parecem agrupar-se aproximadamente de acordo com o seguinte padrão:

2002-2005	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3	Eixo 4
pH	0,195	0,961	0,011	-0,022
Cond	-0,764	0,445	-0,048	-0,139
Temp	0,798	-0,105	0,386	-0,334
Cl	-0,363	0,292	0,635	0,397
Ca	-0,96	0,243	-0,093	-0,016
SO4	-0,968	0,018	-0,196	0,076
Fe	-0,911	-0,236	0,264	-0,127
Mn	-0,946	-0,228	0,15	-0,041
Ra	-0,905	-0,333	0,214	-0,112
K	-0,069	0,401	0,3	-0,815
Utót	-0,944	-0,236	0,191	-0,077
Na	0,143	0,32	0,807	0,314
Ba	-0,607	0,623	-0,438	0,107

Tabela 7-5 – Resultados da ACP – Coordenadas das variáveis nos 4 primeiros eixos.

- Condutividade, Ca, Mn, U₃O₈, Ra, SO₄ e Fe, associadas ao semi-eixo negativo do Eixo 1 – Grupo E;
- Temperatura, isolada, associada ao semi-eixo positivo do Eixo 1 - Grupo F;
- pH e Ba, associadas ao semi-eixo positivo do Eixo 2 - Grupo G;
- Na e Cl, associadas ao semi-eixo positivo do Eixo 3 - Grupo H;
- K, isolada, associada ao semi-eixo negativo do Eixo 4 - Grupo I;

Para além das tendências atrás enunciadas, uma análise da Tabela 7-5 permite ainda reconhecer que a variável Ba (grupo G) é atraída com idêntica intensidade pelo Grupo E.

Da observação da Tabela 7-6 e da Figura 7-3, verifica-se de novo uma marcada tendência de oposição entre furos e poços.

2002-2005	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3	Eixo 4
CIIA	-2,359	-0,583	0,229	-0,125
Ef_L	-0,976	0,94	-0,651	0,349
F01	0,042	0,389	0,681	0,244
F10	0,284	-0,059	0,169	-0,023
F02	0,166	0,519	0,507	0,214
F03	0,113	0,493	0,149	-0,898
F05	0,43	-0,098	0,09	-0,015
F06	0,432	-0,154	0,181	0,007
P01	0,304	-0,321	-0,054	0,112
P02	0,252	-0,251	-0,156	0,1
P03	0,394	-0,337	-0,25	0,074
P04	0,329	-0,326	0,018	0,209
P05	0,39	-0,247	-0,305	0,015
CIA	0,199	0,033	-0,608	-0,263

Tabela 7-6 – Resultados da ACP – Coordenadas dos indivíduos nos 4 primeiros eixos.

Desta forma:

- O Eixo 2 discrimina os Céus Abertos e o Efluente Lançado: o Céu Aberto I (CIA) embora apenas de forma ligeira, e o Efluente Lançado (Ef_L) situam-se no semi-eixo positivo, enquanto que o Céu Aberto II (CIIA) se situa no semi-eixo negativo;
- O Eixo 3 diferencia os furos dos poços: os furos encontram-se associados ao semi-eixo positivo, encontrando-se os poços associados ao semi-eixo negativo;

As variáveis do Grupo E - Condutividade, Ca, Mn, U₃O₈, Ra, SO₄ e Fe – encontram-se, tal como anteriormente as do Grupo A, associadas ao semi-eixo negativo do Eixo 1, e traduzem a radioactividade existente na antiga exploração mineira – reflectem ambiente de mina e a presença do granito ou do filão de quartzo mineralizado em urânio.

Evidenciam igualmente a presença de minerais ferromagnesianos dos granitos (e.g. biotite) bem como as operações de tratamento efectuadas, quer com ácido sulfúrico (utilizado para lixiviação do minério pobre e posterior recolha de licores) quer com leite de cal (hidróxido de cálcio, Ca (OH)₂ , utilizado com vista à neutralização do pH das águas residuais). Representam também o processo de tratamento de efluentes, traduzido pela adição de cloreto

de bário, formando sulfato de bário, que precipita. O Ra substitui depois o Ba, co-precipitando como Ba(Ra) SO₄.

Uma vez mais vem a presença de Mn salientar a adsorção de rádio por parte do hidróxido daquele elemento.

A variável do Grupo F - Temperatura, isolada, associa-se ao semi-eixo positivo do Eixo 1, parecendo opor-se aos anteriores processos químicos;

As variáveis do Grupo G - pH e Ba, associadas ao semi-eixo positivo do Eixo 2, revelam a influência do pH no tratamento com cloreto de bário.

As variáveis do Grupo H – Na e Cl, associadas ao semi-eixo positivo do Eixo 3. O Na revela dissolução dos feldspatos dos granitos. O Cl parece encontrar-se ligado à presença de apatite, Ca₅(PO₄)₃(F,Cl,OH) ou cloro-apatite, Ca₅(PO₄)₃Cl.

A variável do Grupo I – K, ligada ao semi-eixo negativo do Eixo 4, revela a dissolução dos feldspatos e/ou minerais ferromagnesianos dos granitos.

7.6. Síntese

Nos dois períodos considerados (1991-2001 e 2002-2005) muito embora os grupos de variáveis mantenham aproximadamente as estruturas anteriormente indicadas, altera-se a sua ligação aos eixos. Assim (vd. Tabela 7-7):

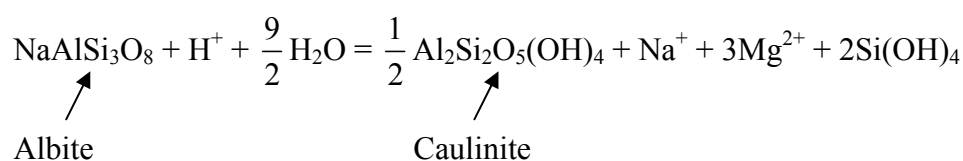
- Tanto no período 1991-2001 como no período 2002-2005 que os **Grupos A e E**, constituídos pelo núcleo de variáveis Condutividade, Ca, Mn, U₃O₈, Ra, SO₄ e Fe, se encontram associados ao semi-eixo negativo do Eixo 1, reflectindo ambiente de mina e a presença da mineralização em urânio.

Ambos os Grupos revelam as operações de lixiviação efectuadas com ácido sulfúrico (utilizado para lixiviação do minério pobre, com vista à recolha de licores de urânio).

Espelham igualmente a presença de minerais ferromagnesianos dos granitos (por exemplo, anfíbulas ou biotite) os quais, através de processos de oxidação-redução, transformam o Fe²⁺ em Fe³⁺, dando seguidamente origem a outros minerais de ferro, como limonite, goethite ou hematite.

- No período 1991-2001, o grupo constituído pelas variáveis pH, Na, K e Ba (**Grupo B**) reflecte quer as operações de tratamento de efluentes, através do uso de leite de cal (hidróxido de cálcio, Ca (OH)₂, utilizado para neutralização do pH das águas residuais) quer a adição de cloreto de bário, promovendo a formação de sulfato de bário, que precipita (o Ra substitui o Ba, co-precipitando como Ba(Ra) SO₄).

O Grupo B parece igualmente expressar fenómenos de dissolução incongruente dos minerais silicatados (feldspatos), exemplificados através da reacção

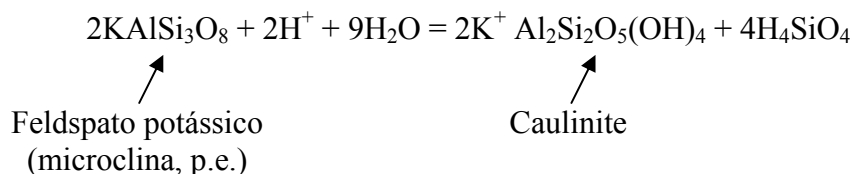


	Eixo 1-		Eixo 1+		Eixo 2-		Eixo 2+		Eixo 3-		Eixo 3+		Eixo 4-		Eixo 4+	
	Variáveis	Indivíduos	Variáveis	Indivíduos	Variáveis	Indivíduos	Variáveis	Indivíduos	Variáveis	Indivíduos	Variáveis	Indivíduos	Variáveis	Indivíduos	Variáveis	Indivíduos
1991-2001	Condutividade	CHIA					pH	Efl_			Temperatura				Cl	
	Ca	Efl_					Na									
	Mn						K									
	U ₃ O ₈						Ba									
	Ra															
	SO ₄															
	Fe															
2002-2005	Condutividade	CHIA	Temperatura				pH	Efl_			Na	F01	K	F03		
	Ca	Efl_					Ba				Cl					
	Mn															
	U ₃ O ₈															
	Ra															
	SO ₄															
	Fe															

Tabela 7-7 – Resultados da Análise em Componentes Principais: ligação das variáveis e indivíduos aos eixos.

Já no período 2002-2005 apenas as variáveis pH e Ba (**Grupo G**) se associam ao mesmo semi-eixo, reflectindo os fenómenos de tratamento de efluentes com leite de cal e adição de cloreto de bário antes referidos.

Ainda neste período 2002-2005, também o **Grupo I**, constituído unicamente pela variável K, é susceptível de traduzir a hidrólise do feldspato potássico, de acordo com a reacção



- No período 1991-2001, o **Grupo C** é constituído apenas pela variável Temperatura, que se associada ao semi-eixo positivo do Eixo 3; no período 2002-2005, a variável Temperatura continua isolada, embora agora se associe ao semi-eixo positivo do Eixo 1 - **Grupo F**, parecendo indicar oposição com os fenómenos relacionados com o Grupo E;

- No período 1991-2001, o **Grupo D**, constituído pela variável Cl, que se associada ao semi-eixo positivo do Eixo 4, encontra-se relacionado com a presença de apatite, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$; já no período 2002-2005, o **Grupo H**, constituído pelas variáveis Na e Cl, parece, para além da presença de apatite ou cloro-apatite, revelar igualmente dissolução dos feldspatos dos granitos.

Da análise das Figuras 7-2 e 7-3 e das tabelas 7-3 a 7-7, verifica-se igualmente uma marcada tendência de oposição entre furos e poços, facto que vem confirmar a concepção inicial da existência de dois aquíferos na região em estudo.

Para além do referido, verifica-se também que:

- Os Grupo A e E se encontram normalmente associados ao Céu Aberto II (CIIA) e ao Efluente Lançado (Efl_) – no Céu Aberto II teve lugar o processo de lixiviação ácida, enquanto que o Efluente Lançado reflecte o tratamento efectuado.

- Os Grupos B e G se associam ao Efluente Lançado (Efl_) – o Efluente traduz os processos de tratamento realizados;

- O Grupo H se liga ao Furo 1 – este Furo situa-se sobre o filão (a tecto do mesmo) podendo reflectir tanto a ocorrência de apatite magmática, como hidrotermal;

- O Grupo I se relaciona com o Furo 3, espelhando o processo de hidrólise dos feldspatos potássicos;

Embora não se encontrem ainda completamente esclarecidas as circunstâncias que presidiram à mudança de comportamentos dos grupos de variáveis, uma vez que as alterações verificadas nos dois períodos considerados não parecem ser substanciais, tal poderá dever-se tanto a uma alteração das condições físico-químicas até aí prevalentes no geo-sistema, como reflectir uma modificação de resultados causada pela mudança de laboratórios e métodos analíticos utilizados.

8. Escoamento e transporte

8.1. Introdução

Com vista a uma melhor caracterização hidrogeológica da área estudada, foi efectuado um ensaio de traçagem, utilizando o método do gradiente natural.

Pretendia-se com este ensaio recolher dados que permitissem obter valores para alguns parâmetros hidráulicos, como sejam o coeficiente de dispersão hidrodinâmica e os coeficientes de dispersividade longitudinal e transversal.

O local onde o ensaio foi efectuado situa-se na caixa de falha ocupada pela ribeira de Castelejo (Figura 2-9) e distribui-se localmente de acordo com a planta que se apresenta na Figura 8-1, abaixo apresentada.

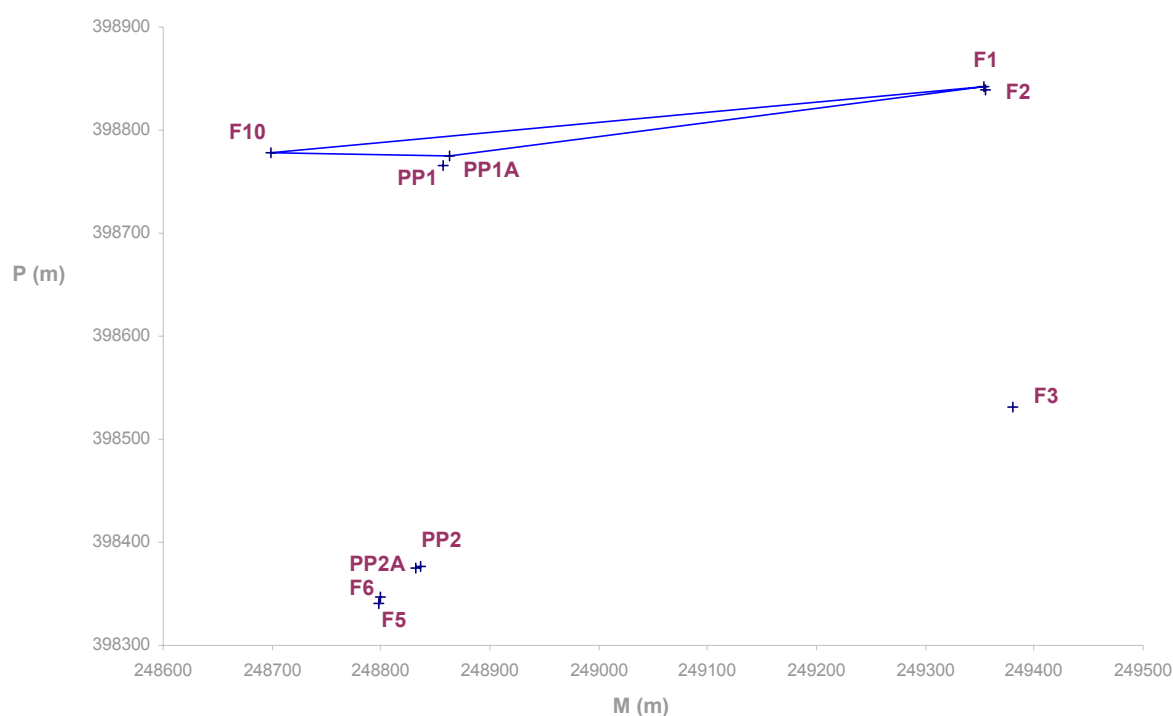


Figura 8-1 – Localização dos furos/piezómetros existentes na mina de Castelejo.
(O triângulo assinalado corresponde ao local em que foi efectuado o ensaio de traçagem).

Para o ensaio de traçagem foram utilizados 4 furos, sendo que 3 deles constam da configuração triangular acima representada.

Ainda que não fosse certo que o Furo 1 captasse o aquífero superficial, foi este utilizado como furo de injeção do traçador, uma vez que apresentava profundidade ligeiramente maior do que o Furo 2 e esse aspecto parecia assegurar a possibilidade de o traçador poder ser transportado a maior distância; os furos PP1-A e F10, que parecem captar o aquífero livre superficial, foram utilizados como furos de monitorização do ensaio. Embora não possuamos logs litológicos dos furos utilizados na monitorização da água subterrânea da mina de Castelejo (com excepção dos furos mais recentes PP1/PP1A e PP2/PP2A, dos quais possuímos a descrição litológica) foi possível determinar com razoabilidade que os furos PP1-A e F10 captam o aquífero livre superficial, com base na medição das suas profundidades e em diversos logs litológicos, referentes a um conjunto de furos efectuados no âmbito do plano de prospecção inicial da mina.

O Furo PP1, embora tenha sido utilizado como furo de monitorização, não foi utilizado na triangulação por captar água pertencente ao aquífero inferior, isto é, água de um nível aquífero subjacente ao nível aquífero superficial (ver Tabela AI-4).

8.2. Ensaio de traçagem

Com vista à implementação do ensaio de traçagem, utilizaram-se 3 fluorímetros de campo GGUN-FL, produzidos pelo Grupo de Geomagnetismo do Instituto de Geologia da Universidade de Neuchâtel (Schnegg 2002).

Idealmente, um traçador deverá ser uma substância não reactiva, transportada pela água à velocidade desta, por forma a permitir extrair conclusões sobre o comportamento de determinado sistema hidrológico ou hidrogeológico.

Diversos traçadores podiam utilizar-se no ensaio. Optámos por utilizar uranina, um corante fluorescente, tendo em conta o seu custo, as suas características, a quantidade disponível e a experiência anterior, tanto pessoal, como documentada, com este tipo de material.

A uranina ou fluoresceína sódica, de fórmula química $C_{20}H_{10}Na_2O_5$, é um corante de fluorescência verde, que se apresenta como pó avermelhado. Quando dissolvida em água, a cor altera-se de vermelho para verde. Deve ter-se em consideração que a uranina é fotodegradável, pelo que a dissolução deve realizar-se por forma a evitar contacto com a luz.

Procedeu-se à injeção de 762 g de uranina dissolvida em cerca de 30 l de água, através de uma mangueira com 9,8 m de comprimento, na extremidade da qual se encontrava inserido um funil destinado a facilitar a entrada da solução no furo (Figuras 8-3 a 8-5). Com vista a satisfazer as necessidades de água – para dissolução e ajuda à injeção da uranina no furo - foi requisitado um camião cisterna aos Bombeiros Voluntários de Gouveia (Figura 8-2) debitando a cisterna um caudal estimado em cerca de 30 l/minuto.



Figura 8-2 – Camião-cisterna dos Bombeiros de Gouveia junto do local de traçagem.



Figura 8-3 – Injecção de uranina no furo.



Figura 8-4 – Injecção de solução no furo, notando-se o seu sobre-enchimento.

A injeção efectuou-se de forma intermitente, i.e., foi feita de forma a que a solução se elevasse o mais possível no funil, seguindo-se um período de repouso em que se aguardava a recuperação do nível, após o que tinha lugar novo ciclo de injeção/repouso.



Figura 8-5 – Injecção de água no furo, com vista a uma melhor dispersão do traçador.

O sentido do escoamento bem como o gradiente hidráulico foram determinados com base no método de triangulação, sendo conhecidas as posições geográficas relativas dos furos, a distância entre eles e o potencial total em cada furo (vd. Figura 8-6).

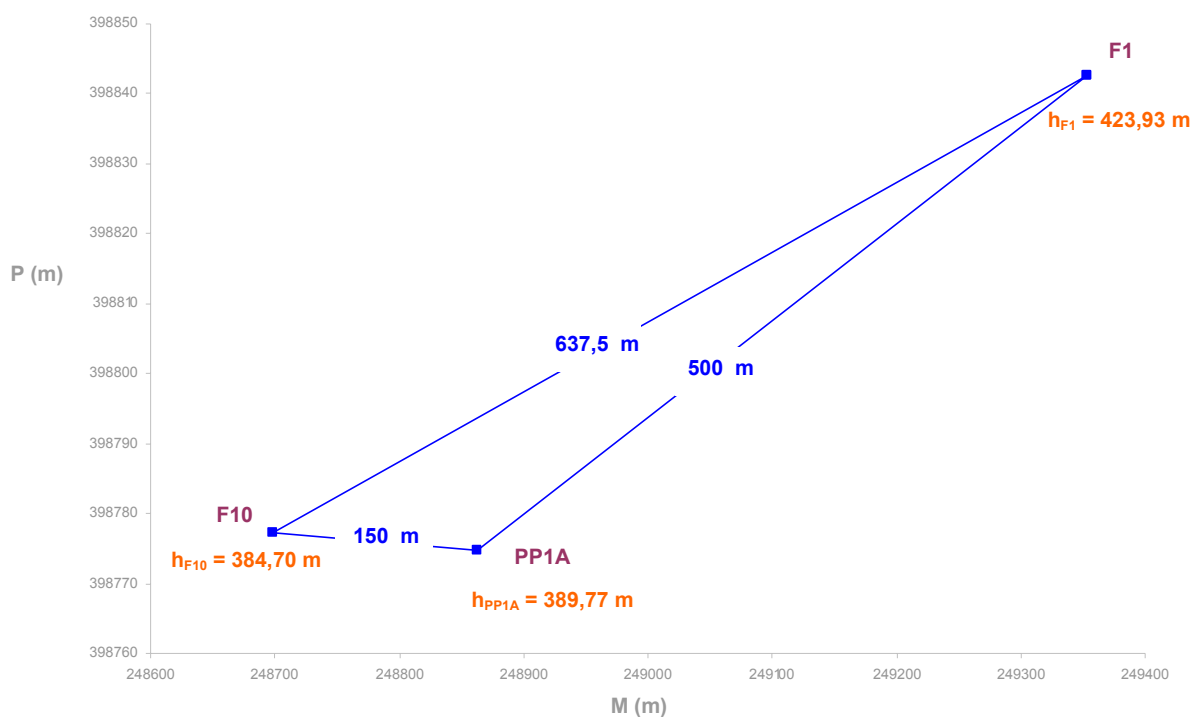


Figura 8-6 – Disposição geral, distâncias e potenciais dos furos utilizados no método de triangulação.

Assim, as etapas em que se escalona o processo são:

- entre os 3 furos utilizados, identificação do furo que apresenta o potencial intermédio;
- cálculo da posição, sobre a recta que une o potencial maior ao potencial menor, em que o potencial seja igual ao intermédio;
- unir através de uma recta a posição calculada anteriormente com a do furo de potencial intermédio, representando esta recta uma linha de isopotencial ou isopiezia;
- traçar uma perpendicular a esta recta, partindo do furo com maior potencial ou em direcção ao furo com menor potencial, a qual representará a direcção do movimento da água subterrânea;
- dividir a diferença entre o potencial do furo utilizado (neste caso, o de menor potencial, veja-se a Figura 8-7) e o da isopiezia, pela distância entre o furo e a isopiezia, assim se obtendo o gradiente hidráulico.

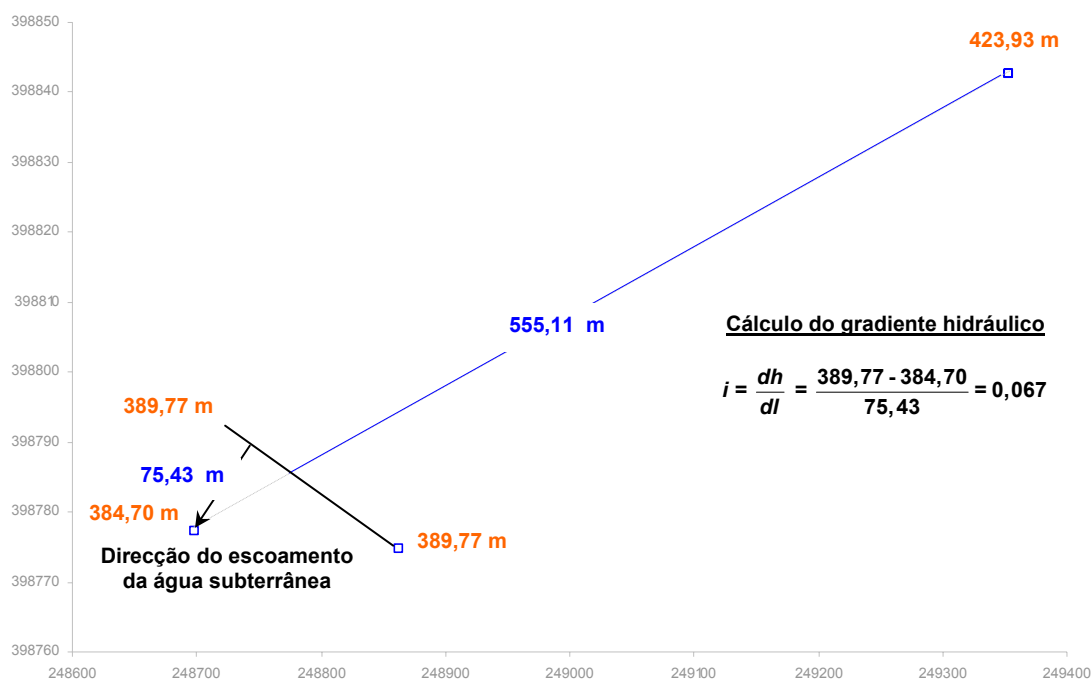


Figura 8-7 – Cálculo da direcção do escoamento e do gradiente hidráulico.

A injeção – vide Figuras 8-3, 8-4 e 8-5 - iniciou-se cerca das 14.00 h de 22/04/2008, tendo sido dada por concluída próximo das 17.00 h. Embora tenha demorado aproximadamente 3 horas, o comportamento do nível da água - que foi registado de forma automática no decurso do ensaio – foi interpretado como “*slug-test*”, isto é, a injeção foi interpretada como instantânea.

O furo em que ocorreu a injeção (F1) situa-se sobre o filão de quartzo mineralizado com urânio que foi objecto de exploração (ver Figuras 2-9 e 8-1). Encontra-se afastado cerca de 1,5 m do furo F2.

De facto, embora a construção destes furos/piezómetros tenha ocorrido há vários anos aparentemente com o intuito de monitorizar a evolução dos níveis e da qualidade da água subterrânea, sendo desconhecidas as suas características (salvo as susceptíveis de serem objecto de medição ou as que nos foram transmitidas oralmente por antigos trabalhadores – como sejam a profundidade dos ralos e as características do entubamento) F1 e F2 aparentam constituir par piezométrico um do outro.

Contudo, não pareceria ser de afastar liminarmente a possibilidade de existência de ligação hidráulica entre ambos, atendendo à sua proximidade.

A grande dificuldade de escoamento da água no furo F1 revelada desde o início da injeção (ilustrada através da Figura 8-4) associada ao facto de em F2 não se verificar qualquer indício de perturbação do meio aquífero - que se poderia materializar, quer pela presença de uranina em F2, quer até por eventuais oscilações do nível freático decorrentes da injeção continuada, embora de forma intermitente, de água em F1 – não viriam todavia a validar a possibilidade de ligação hidráulica acima referida, ganhando força a possibilidade de F1 captar o aquífero profundo e F2 o aquífero superficial, atendendo às suas profundidades.

A instalação dos fluorímetros nos furos/piezómetros processou-se de harmonia com as características que se supunha que os mesmos possuísem, às profundidades sucintamente apresentadas na Tabela 8-1.

<u>Piezómetro</u>	<u>Ralos</u>	<u>Prof. instalação</u>	<u>Prof. total</u>
	<u>de (m)</u>	<u>até (m)</u>	<u>furo (m)</u>
F1	1.5 (?)	25.5 (?)	-
F2	1.5 (?)	21.0 (?)	-
PP1	28.5	40.0	35.0
PP1A	3.0	20.0	15.0
F10	1.5 (?)	17.0 (?)	10.0

Tabela 8-1 – Características dos furos utilizados no ensaio de traçagem.

Apresentam-se igualmente as características de F2 devido à sua proximidade com F1, com o qual parece constituir par piezométrico.

Embora a monitorização em contínuo aos fluorímetros instalados nos furos F10, PP1 e PP1A tenha tido a duração aproximada de 3 meses (de 22/04/2008 a 18/07/2008) não foi possível detectar qualquer vestígio de uranina em qualquer dos locais referidos.

Ainda surgiram algumas dúvidas quanto à interpretação de alguns picos observados, coincidentes, de uranina e turbidez. No entanto, de acordo com o Dr. Pierre Schnegg, do Grupo de Geomagnetismo da Universidade de Neuchâtel, Suíça, com quem tivemos a oportunidade e o privilégio de trocar impressões, tais picos não corresponderiam realmente ao aparecimento de uranina, uma vez que quando se observa uma correlação perfeita entre um traçador e o parâmetro turbidez, na maioria das vezes não é realmente detectado traçador algum; por outro lado, ainda, se não for detectado traçador num espaço de 6 semanas após a injeção, dificilmente ele será detectado depois disso, ou a sua presença será difícil de determinar em quantidades inferiores a 0,1 ppb (partes por bilião) devido à existência de turbidez.

Para além das especificidades acima designadas, algumas razões que podem ser avançadas relativamente ao fracasso do ensaio de traçagem relacionam-se com a distância existente entre os furos de injeção e monitorização, com o facto do ensaio ter sido implementado com base no método do gradiente natural - isto é, sem recurso a bombagem - e também com as características litológicas e a heterogeneidade local dos terrenos ensaiados, que decisivamente condicionam a sua permeabilidade.

A dificuldade de escoamento da água em F1, aliás patenteada desde o início da injeção como atrás foi referido, viria a materializar-se no facto de, a partir da data de injeção (22/04/2008) não ter sido possível proceder a colheitas de amostras naquele furo, em virtude das suas águas se encontrarem impregnadas de uranina.

De facto, em todas as deslocações ao local a partir daquela data, efectuadas no fim de cada semestre hidrológico (em 26/09/2008, em 26/03/2009 e em 25/09/2009) devido à existência de uranina retida à superfície do furo, não foi efectuada amostragem. Nesta última data procedeu-se à limpeza do furo, para o que se solicitou aos Bombeiros Voluntários de Gouveia a deslocação ao local de um carro-tanque, com capacidade de 6000 l. O carro fez duas viagens

ao local tendo injectado cerca de 12 000 l de água no furo, sendo que, após a injeção, aquele ainda apresentava vestígios de uranina (Figuras 8-8 a 8-11) .



Figura 8-8 – Carro-tanque dos Bombeiros de Gouveia utilizado na limpeza do furo de traçagem.



Figura 8-9 – Injeção de água, com vista à limpeza do furo de traçagem.



Figura 8-10 – Injecção de água no furo.



Figura 8-11 – Injecção de água no furo (outra perspectiva).

A limpeza foi efectuada por injeção de água através de uma mangueira que foi colocada em contacto com o fundo do furo, a fim de proporcionar uma maior desadsorção da uranina presente nos materiais constituintes, quer do fundo, quer das paredes do furo.

Atente-se na proximidade dos furos F1 e F2 e também no facto de, apesar da limpeza de F1 ter ocorrido cerca de ano e meio após a injeção, ao longo de todo este tempo não terem sido detectados vestígios de uranina em F2.

8.3. Slug-test

No furo utilizado com vista à injeção do traçador (F1) foi instalado um dispositivo de medição automática do nível da água, tendo este começado a ser registado previamente à injeção. Para tal, foi utilizada uma sonda WinSitu, que mede de forma automática o nível da água e a sua recuperação dentro do furo, a intervalos de tempo pré-estabelecidos.

O automatismo deste tipo de medição, aplicado à subtração ou injeção instantânea de um volume conhecido de água no furo, faz com que os resultados sejam interpretados como “*slug-tests*”, permitindo obter alguns parâmetros a partir da interpretação do ensaio.

Foi registado o comportamento do nível da água durante todo o período em que decorreu o ensaio de traçagem. O registo começou ligeiramente antes e terminou imediatamente depois de se ter dado como concluído o ensaio de traçagem.

O gráfico seguidamente apresentado ilustra a evolução temporal do nível da água durante o período em que decorreu o ensaio.

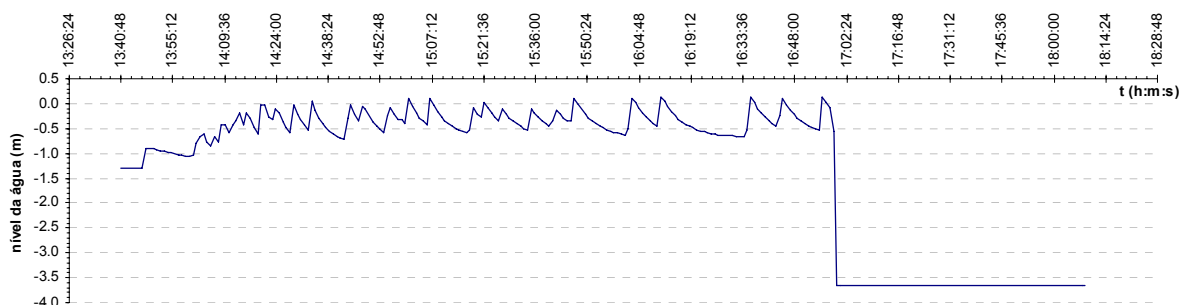


Figura 8-12 – Registo nível da água vs. tempo no furo de injeção (F1) no decurso do ensaio de traçagem.

O ensaio consistiu na injeção de uranina previamente dissolvida em água no furo F1. Atendendo à grande dificuldade de recuperação do nível da água e à necessidade de introduzir o máximo possível de solução no furo, a fim de maximizar as probabilidades de propagação do traçador no subsolo, a injeção foi efectuada de forma intermitente. Desta forma, na sequência de cada injeção o nível da água elevava-se até praticamente transbordar, tendo que se esperar pela sua recuperação até proceder a nova injeção.

Nestas condições, cada um dos picos constantes do gráfico exibido na Figura 8-12 pode ser representado como um “*mini slug-test*”. Na totalidade do ensaio acima reproduzido foram eleitos 5 troços, que foram considerados como 5 “*mini slug-tests*”. Cada um dos 5 “*slug-tests*” foi interpretado de acordo com o método de Hvorslev.

A Figura 8-13 ilustra a geometria de um piezómetro instalado num aquífero. No caso de um piezómetro instalado numa unidade de baixa permeabilidade - ver Figura 8-13 (B) -, o raio da zona de ralos, R , é tomado como o raio de todo o furo, incluindo o maciço filtrante, enquanto que o comprimento da zona de ralos, L_e , é considerado como o comprimento do maciço filtrante.

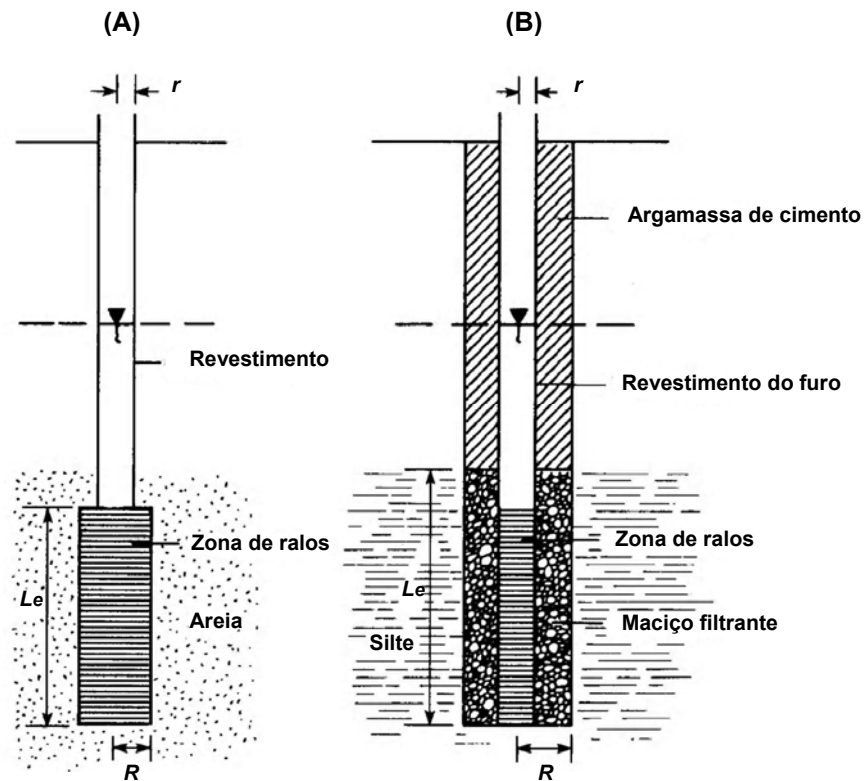


Figura 8-13 – Adaptação do método de Hvorslev à disposição geométrica do piezómetro. (adaptado de Fetter, 1994).

Como já foi referido, um “*slug-test*” consiste na adição ou subtracção instantânea de água a um furo. O nível da água é medido antes e imediatamente após ter lugar a adição de água ao furo. Os níveis são então medidos a intervalos espaçados, à medida que a recuperação se aproxima do nível inicial da água (nível estático).

Consideremos a adição instantânea de água a um furo. A altura a que o nível da água se eleva acima do nível estático imediatamente após a adição de água é h_0 . A altura do nível da água acima do nível estático algum tempo, t , após a adição de água é h .

Se projectarmos h/h_0 em função de t em papel semi-logarítmico, deveremos obteremos uma recta de rebaixamento-tempo.

A Figura 8-14 ilustra a projecção h/h_0 em função de t relativamente ao 1º troço interpretado.

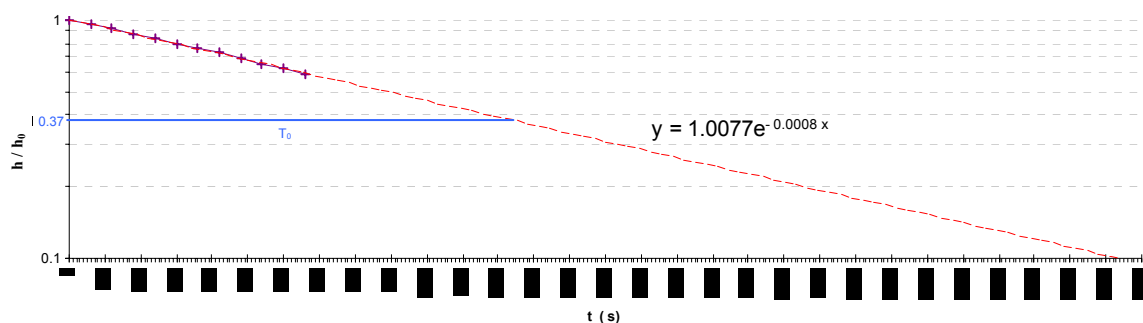


Figura 8-14 – Projecção do rebaixamento em função do tempo com aplicação ao método de Hvorslev.

Considerando o comprimento do piezómetro maior do que 8 vezes o raio dos ralos ($L_e/R > 8$) aplica-se a fórmula seguinte:

$$K = \frac{r^2 \ln(L_e/R)}{2 L_e T_0} \quad (\text{Eq. 8-1})$$

sendo

K - condutividade hidráulica [L/T];

r - raio do revestimento do furo [L];

R - raio dos ralos [L];

L_e - comprimento dos ralos [L];

T_0 - tempo que demora a recuperação do nível da água até este atingir 37 % da variação inicial [T].

A Equação 8-1 é uma de entre várias apresentadas por Hvorslev para diferentes condições piezométricas e do aquífero. No entanto, pode aplicar-se facilmente a condições de aquífero livre e diversas configurações piezométricas em que o comprimento do piezómetro seja substancialmente superior ao raio dos ralos do furo.

Nestes termos, extrai-se do gráfico que $T_0 = 1274,11$ s. Por outro lado, sendo a altura do furo = 26 m e o diâmetro do tubo = 0,09 m, segundo informação obtida junto de um antigo trabalhador da ENU, deverão ser a altura dos ralos = 25 m, a altura do maciço filtrante = 25,5 m e o diâmetro do furo = 0,12 m. Assim,

r - 0,045 m

R - 0,06 m

L_e - 25,5 m

T_0 - 1274,11 s

Atribuindo aos parâmetros constantes da Equação os valores acima indicados, obtemos para a condutividade hidráulica do 1º troço o valor $K_1 \approx 1,9 \times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$, enquanto que a condutividade hidráulica média dos 5 troços analisados apresenta valores na ordem de $\overline{K_{1-5}} \approx 2,6 \times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$. Encontramo-nos, pois, em presença de uma condutividade hidráulica moderadamente baixa (Freeze & Cherry, 1979).

8.4. Temperatura

O ensaio de traçagem permitiu também monitorizar as temperaturas dos furos em que foram instalados os fluorímetros.

Os dados relativos às temperaturas registadas nos fluorímetros instalados nos furos F10, PP1 e PP1A são os constantes da Tabela 8-2.

Temperatura da água	F10	PP1	PP1A
Média	14.78193	16.75725	14.94798
Mediana	14.77	16.76	14.95
Moda	14.77	16.76	14.94
Desvio-padrão	0.031348	0.00669	0.024506
Variância	0.000983	0.0000448	0.000601
Mínimo	14.64	16.17	14.6
Máximo	14.91	16.77	15.11
Total de medidas	62499	62481	62507

Tabela 8-2 – Estatísticos básicos referentes às temperaturas registadas nos fluorímetros.

As temperaturas constantes da Tabela 8-2 indiciam que os Furos 10 e PP1A captam água dum nível aquífero diferente do captado através do Furo PP1.

A diferença de temperaturas evidenciada através dos resultados da Tabela 8-2 revela a presença de dois níveis aquíferos distintos, correspondentes a um aquífero superficial - detectado pelos fluorímetros instalados nos Furos 10 e PP1A – e um aquífero profundo, subjacente ao primeiro, detectado pelo fluorímetro instalado no Furo PP1.

Embora, com base nas razões oportunamente apresentadas, a existência de dois níveis aquíferos fosse previsível, os resultados agora obtidos permitem contudo estabelecer a zona limite entre os dois aquíferos. De acordo com a interpretação dos “logs” de sondagem relativos aos furos PP1 e PP1A, tal zona limite considera-se situada aproximadamente nos 28 m de profundidade.

Também as leituras dos níveis piezométricos relativas aos furos F10, PP1 e PP1A apontam no sentido de que os furos F10 e PP1A se encontram situados no aquífero livre superior, enquanto que o furo PP1 capta água do aquífero inferior, o qual apresenta carácter confinado, ou localmente semi-confinado, e artesianismo.

8.5. Piezometria

Foram recolhidos dados relativos aos níveis da água subterrânea nos diversos furos/piezómetros instalados nas imediações da mina do Castelejo e integrados no sistema de monitorização da mesma, implementado pela administração da exploração.

Os dados por nós recolhidos nos diferentes piezómetros foram integrados com os dados relativos à monitorização ambiental efectuada desde há vários anos pelos responsáveis pela exploração. Pretende-se desta forma obter uma imagem, o mais fiel possível, da evolução piezométrica da zona estudada ao longo do tempo.

8.5.1. Atenuação de dados – o método LOWESS

As ferramentas de atenuação de dados são normalmente utilizadas no sentido de revelar ou realçar alguma tendência subjacente aos dados. Os dados deverão encontrar-se projectados através de um gráfico de dispersão X-Y (ou nuvem de pontos - “scatterplot”) revelando-se a tendência através de uma linha que passa pelo seu centro, ajudando assim na interpretação da linearidade ou alterações de declive verificadas.

Existem diversos métodos que podem ser utilizados num processo de atenuação de dados. O método que vamos utilizar designa-se de LOWESS (LOcally WEighted Scatterplot Smoothing) e é um método de atenuação por regressão local (Cleveland, W., 1979, Cleveland, W. & Loader, C., 1996).

Consiste no ajustamento de um número mínimo de 2ⁿ equações dos mínimos quadrados ponderados - *Weighted Least Squares*, *WLS* (Helsel, D. & Hirsch, R., 1992).

Em cada X_θ , um \hat{Y} é calculado a partir de uma regressão WLS cujos pesos são uma função tanto da distância a X_θ , como da magnitude do erro (resíduo) da regressão anterior (um procedimento iterativo). Os pesos, w_i , da regressão, são calculados através de (Equação 8-2):

$$w_i = w_{x_i} \cdot w_{r_i} \quad (\text{Eq. 8-2})$$

onde w_{x_i} , o ponderador de distância, é uma função da distância entre o centro da janela X_i e todos os outros X . O ponderador dos resíduos, w_{r_i} , é uma função de $|Y_i - \hat{Y}_i|$, a distância na direcção Y entre o Y_i observado e o valor previsto a partir da equação WLS anterior.

Um ponto receberá um peso pequeno e, portanto, terá pouca influência sobre o atenuado \hat{Y} , se estiver longe do centro da janela na direcção X ou tiver um grande resíduo na direcção Y . A medida de quão rapidamente os pesos diminuem com o aumento das distâncias nas direcções X e Y é determinada pela função de ponderação. Para um ponto (X_i, Y_i) , o ponderador biquadrado (“*bisquare weight*”) é dado por (Equações 8-3 a 8-6):

$$w_{r_i} = \begin{cases} (1 - u_i^2)^2 & \text{para } |u_i| \leq 1 \\ 0 & \text{para } |u_i| > 1 \end{cases} \quad (\text{Eq. 8-3})$$

sendo

$$u_i = \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{6 \cdot \text{mediana } |Y_i - \hat{Y}_i|} \quad (\text{Eq. 8-4})$$

$$w_{x_i} = \begin{cases} (1 - v_i^2)^2 & \text{para } |v_i| \leq 1 \\ 0 & \text{para } |v_i| > 1 \end{cases} \quad (\text{Eq. 8-5})$$

com

$$v_i = \frac{X_i - X}{d_x} \quad (\text{Eq. 8-6})$$

onde d_x corresponde a metade da largura da janela = m -ésima maior $|X_i - X|$;

$m = N f$;

N = tamanho da amostra;

f = factor de atenuação especificado de início;

A atenuação do método LOWESS varia por efeito da alteração da largura da janela, controlada pelo factor de atenuação, f . À medida que f aumenta, o tamanho da janela também aumenta e mais pontos influenciam a magnitude de Y . A selecção de um parâmetro f adequado é determinada subjectivamente, de acordo com a finalidade a que se destina a atenuação.

8.5.2. Atenuação das séries piezométricas

No caso presente, ainda que com algumas alterações relativamente ao acima exposto, designadamente em termos da função de ponderação utilizada, foi aplicado o método LOWESS às séries piezométricas obtidas, tendo sido utilizado $f = 70\% = 0.7$.

Representam-se seguidamente, para cada ponto de água, as evoluções piezométricas verificadas nas datas indicadas. Para além da união dos pontos correspondentes às piezometrias, projecta-se igualmente o operador LOWESS, no sentido de facilitar uma melhor leitura das tendências apresentadas em cada um dos gráficos analisados.

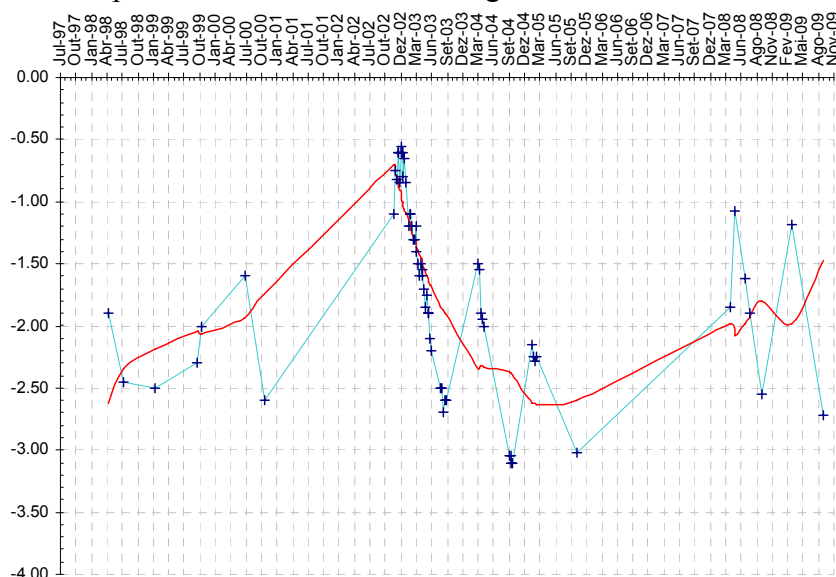


Figura 8-15 – Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro F1.
(A encarnado sobrepõe-se a função de atenuação dada pela aplicação do método LOWESS à série original).

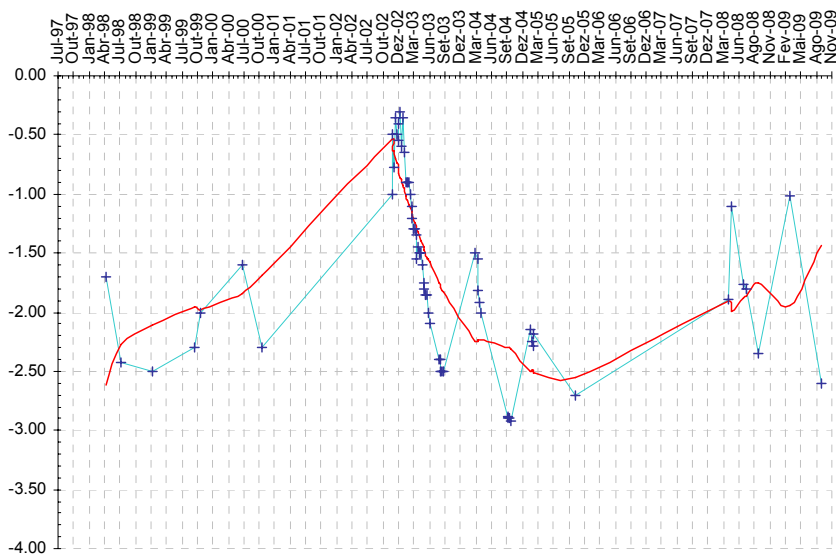


Figura 8-16 – Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro F2.
(A encarnado sobrepõe-se a função de atenuação dada pela aplicação do método LOWESS à série original).

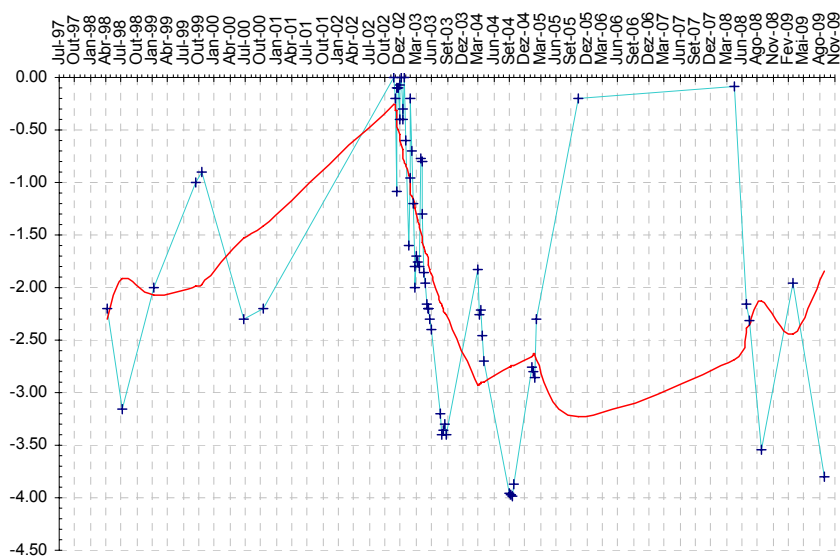


Figura 8-17 – Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro F3.
(A encarnado sobrepõe-se a função de atenuação dada pela aplicação do método LOWESS à série original).

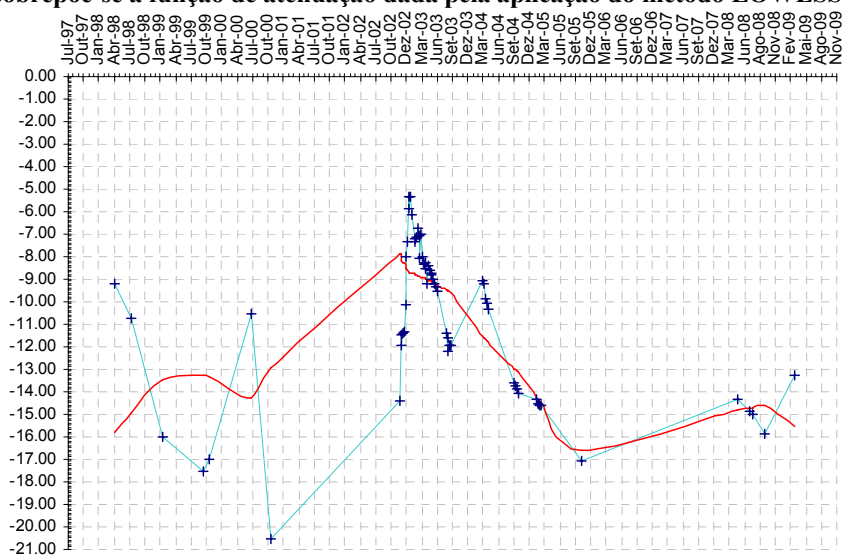


Figura 8-18 – Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro F5.
(A encarnado sobrepõe-se a função de atenuação dada pela aplicação do método LOWESS à série original).

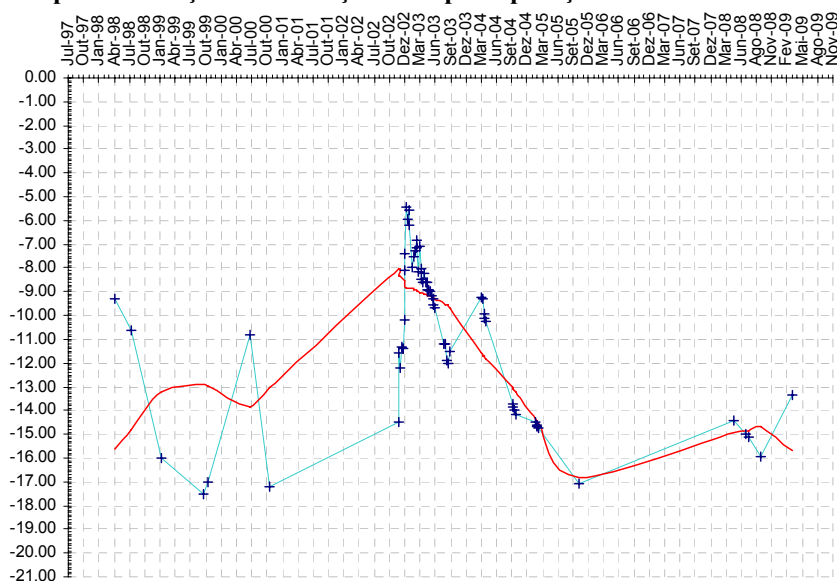


Figura 8-19 – Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro F6.
(A encarnado sobrepõe-se a função de atenuação dada pela aplicação do método LOWESS à série original).

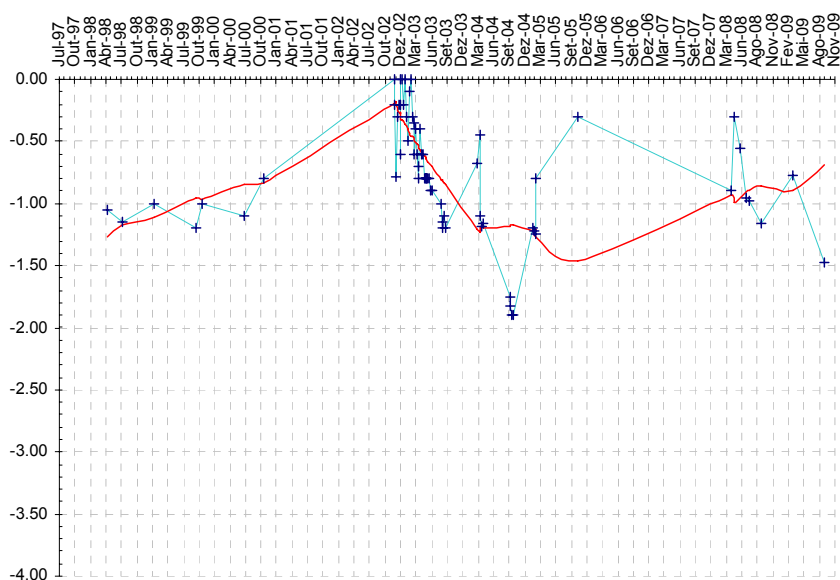


Figura 8-20 – Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro F10.
(A encarnado sobrepõe-se a função de atenuação dada pela aplicação do método LOWESS à série original).

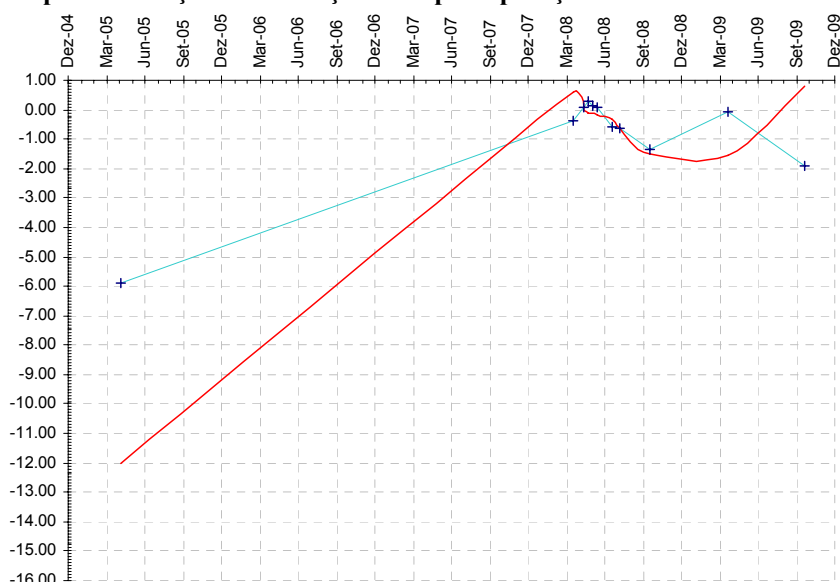


Figura 8-21 – Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro PP1.
(A encarnado sobrepõe-se a função de atenuação dada pela aplicação do método LOWESS à série original).

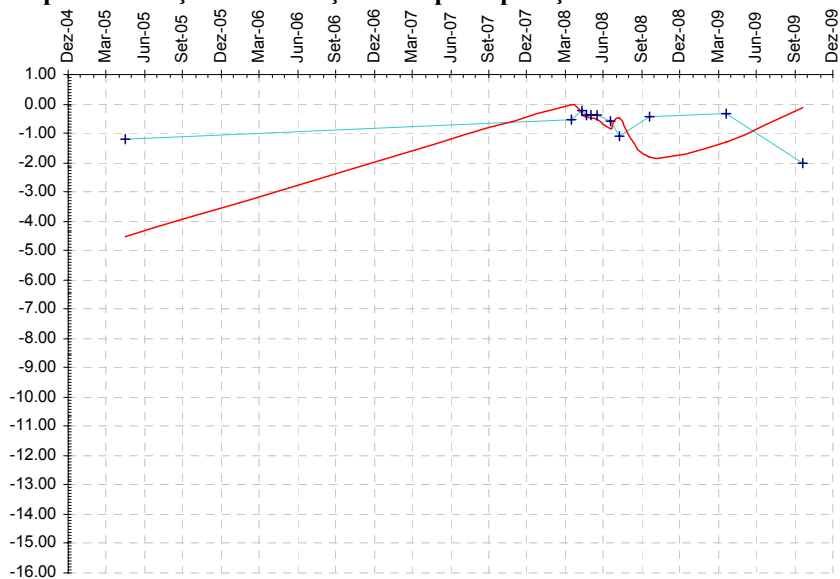


Figura 8-22 – Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro PP1A.
(A encarnado sobrepõe-se a função de atenuação dada pela aplicação do método LOWESS à série original).

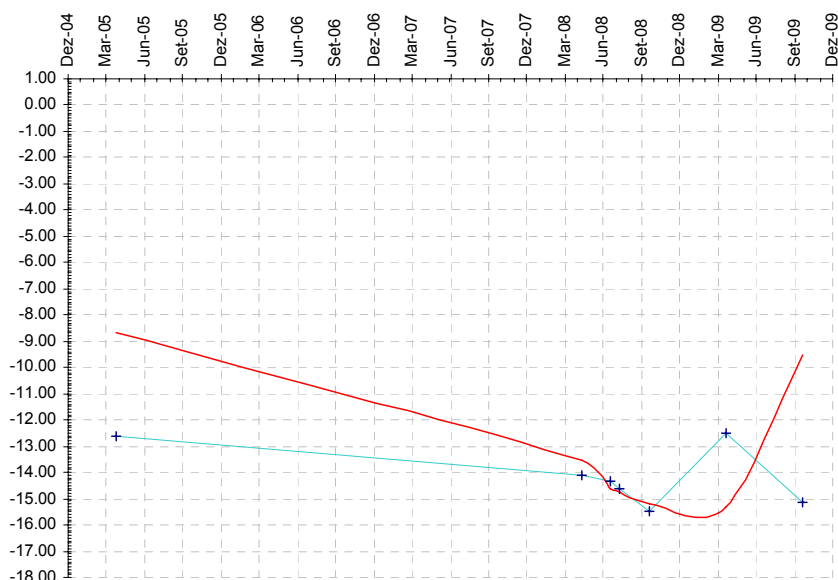


Figura 8-23 – Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro PP2.
(A encarnado sobrepõe-se a função de atenuação dada pela aplicação do método LOWESS à série original).

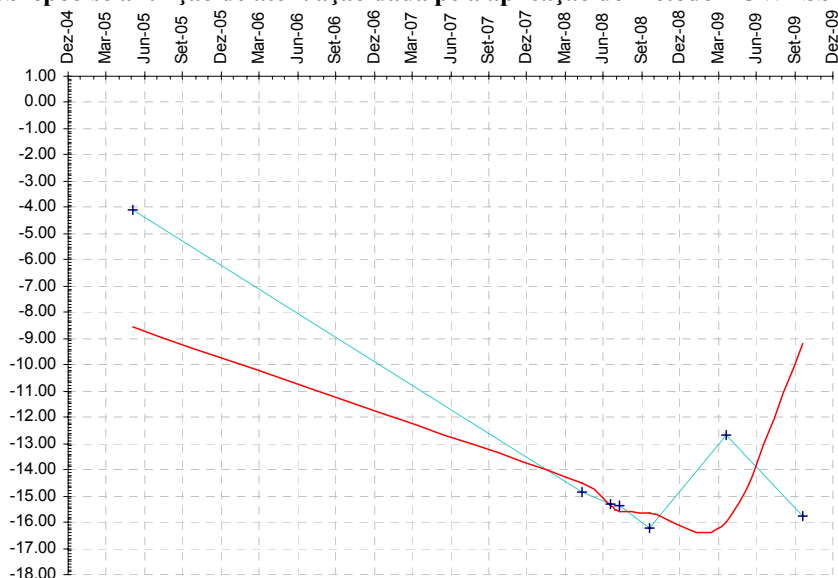


Figura 8-24 – Evolução do nível da água ao longo do tempo – Furo/Piezómetro PP2A.
(A encarnado sobrepõe-se a função de atenuação dada pela aplicação do método LOWESS à série original).

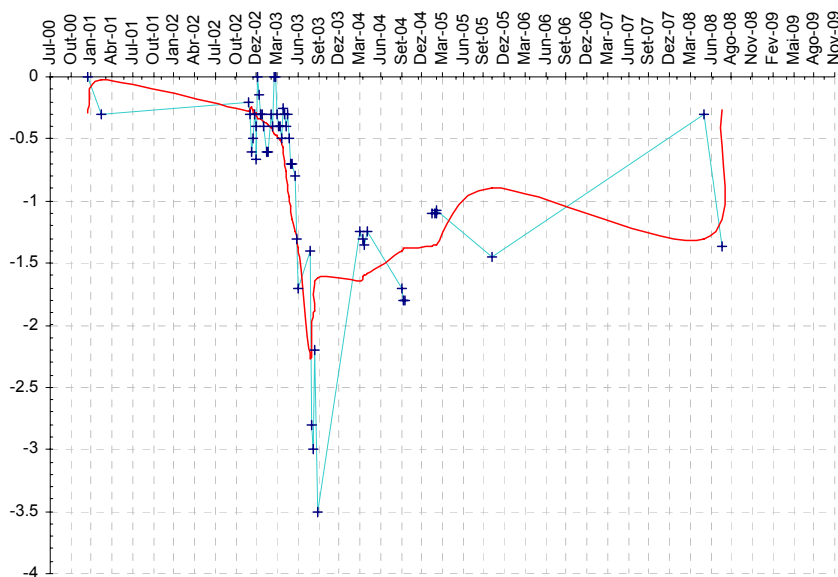


Figura 8-25 – Evolução do nível da água ao longo do tempo - Poço P1.
(A encarnado sobrepõe-se a função de atenuação dada pela aplicação do método LOWESS à série original).

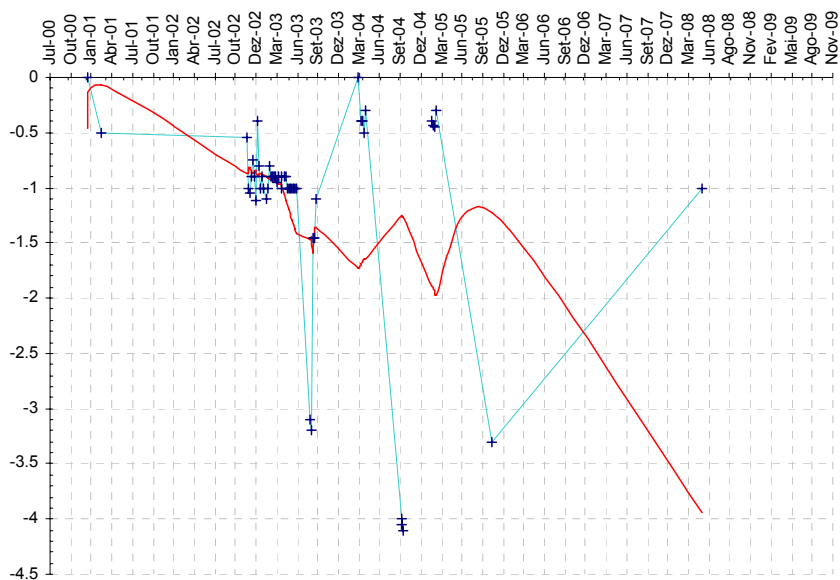


Figura 8-26 – Evolução do nível da água ao longo do tempo - Poço P2.
(A encarnado sobrepõe-se a função de atenuação dada pela aplicação do método LOWESS à série original).

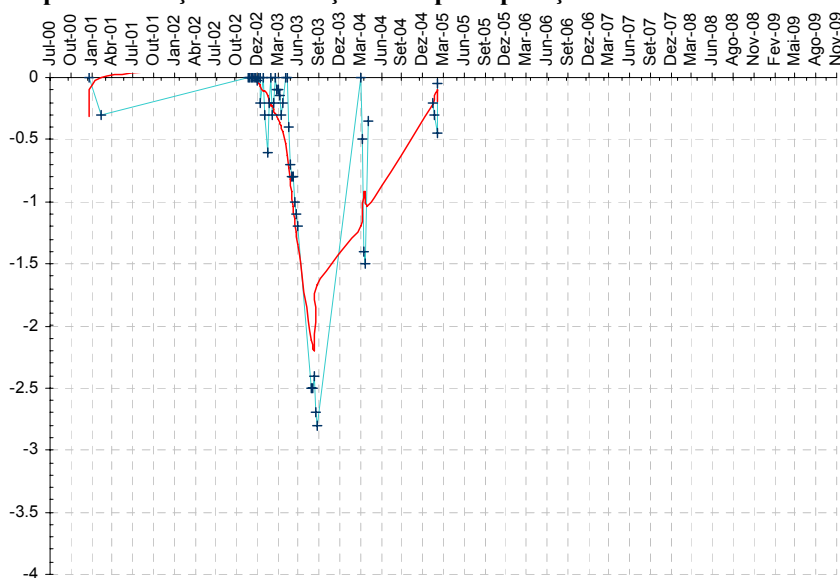


Figura 8-27 – Evolução do nível da água ao longo do tempo - Poço P3.
(A encarnado sobrepõe-se a função de atenuação dada pela aplicação do método LOWESS à série original).

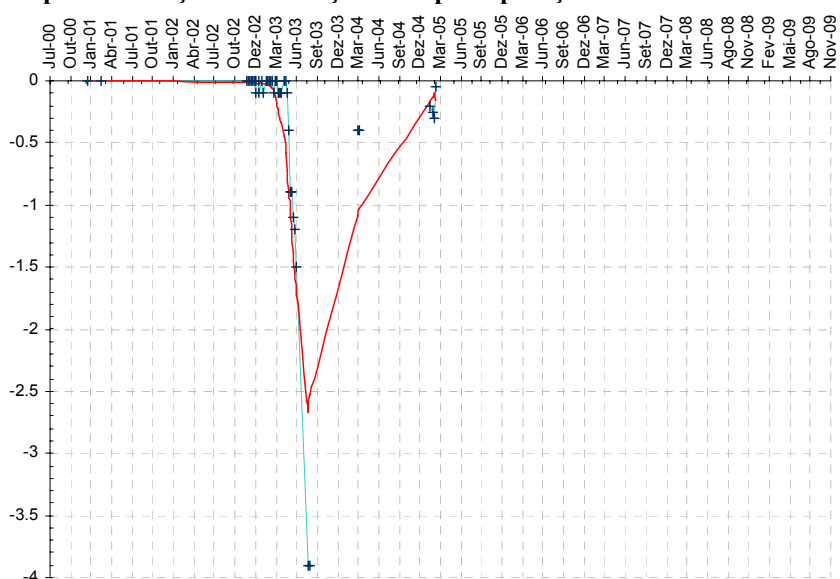


Figura 8-28 – Evolução do nível da água ao longo do tempo - Poço P4.
(A encarnado sobrepõe-se a função de atenuação dada pela aplicação do método LOWESS à série original).

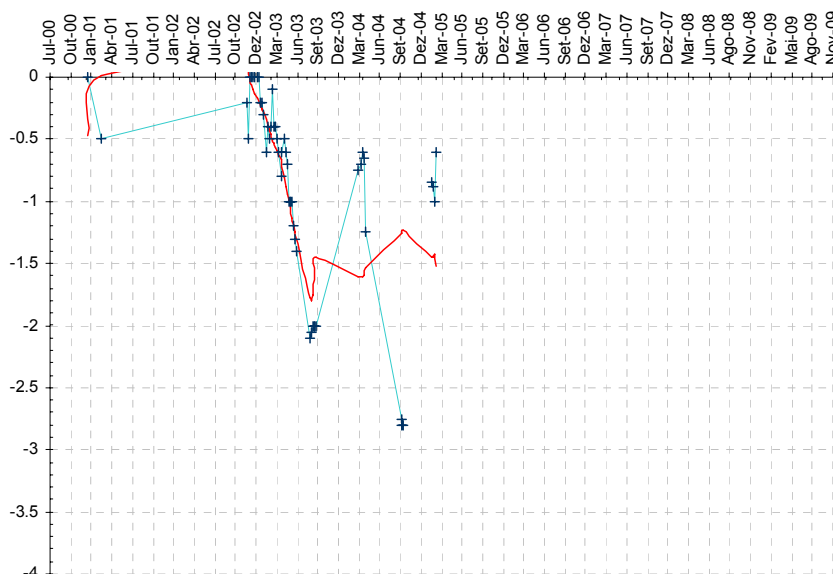


Figura 8-29 – Evolução do nível da água ao longo do tempo - Poço P5.

(A encarnado sobrepõe-se a função de atenuação dada pela aplicação do método LOWESS à série original).

Os pontos de água tomados em consideração são os representados na Figura 5-1, os quais englobam furos/piezómetros e poços. Embora o espaço temporal considerado nos furos /piezómetros seja algo diferente do considerado nos poços (uma vez que, na generalidade, não possuímos dados recentes referentes a poços) a quantidade de dados disponíveis permitiu aplicar a função LOWESS também a estes últimos.

Vejamos agora qual a tendência verificada em cada um dos pontos de água considerados.

Quanto aos furos-piezómetros F1, F2, F3, F5, F6 e F10, todos evidenciam níveis máximos no trimestre compreendido entre Outubro de 2002 e Dezembro de 2002. Pelo contrário, todos reflectem níveis mínimos no trimestre compreendido entre Junho de 2005 e Setembro de 2005, traduzindo os efeitos da seca que então se fez sentir. A tendência por eles revelada, com excepção de F5 e F6 que parecem apontar em sentido inverso, indica uma ligeira recuperação dos níveis piezométricos.

Quanto aos furos-piezómetros recentemente construídos PP1-PP1A e PP2-PP2A, estes evidenciam níveis mínimos no trimestre compreendido entre Dezembro de 2008 e Março de 2009, parecendo em seguida indicar tendência de recuperação.

Já os poços apresentam comportamento diverso do dos furos. Deve referir-se que os poços se situam junto, ou no interior, dos principais eixos de escoamento das águas, a jusante das instalações mineiras, variando as suas profundidades entre os 3 m e os 5.3 m. Na prática, trata-se de escoamento superficial - ou subterrâneo, mas neste último caso muito próximo da superfície.

Com efeito, os poços P1, P3, P4 e P5, parecem comportar-se de forma semelhante, atingindo o nível mínimo no trimestre compreendido entre Junho de 2003 e Setembro de 2003, período a partir do qual tendem a recuperar.

O poço P2, embora com ligeiras inversões mais ou menos pontuais, parece evidenciar uma tendência algo sustentada de descida do nível da água.

8.6. Modelação

Antes de se ter dado início à exploração da mina de Castelejo, foram efectuadas diversos trabalhos de prospecção preliminar, entre eles diversos furos, em ordem a apurar se uma eventual exploração poderia assumir carácter economicamente rentável.

Apresenta-se na Figura 8-30 um mapa onde se localizam, não apenas esses furos, mas também os actualmente utilizados na monitorização da água subterrânea, tanto os mais antigos (F1, F2, F3, F5, F6 e F10) como os mais recentes (PP1, PP1-A, PP2 e PP2-A). Na prospecção preliminar foram efectuados diversos furos inclinados, cuja projecção horizontal se representa na Figura 8-30. O modelo conceptual adiante apresentado reflecte diversa informação coligida a partir da interpretação dos logs de sondagem de alguns destes furos, particularmente dos mais próximos do eixo F1/F2 – PP1/PP1A – F10.

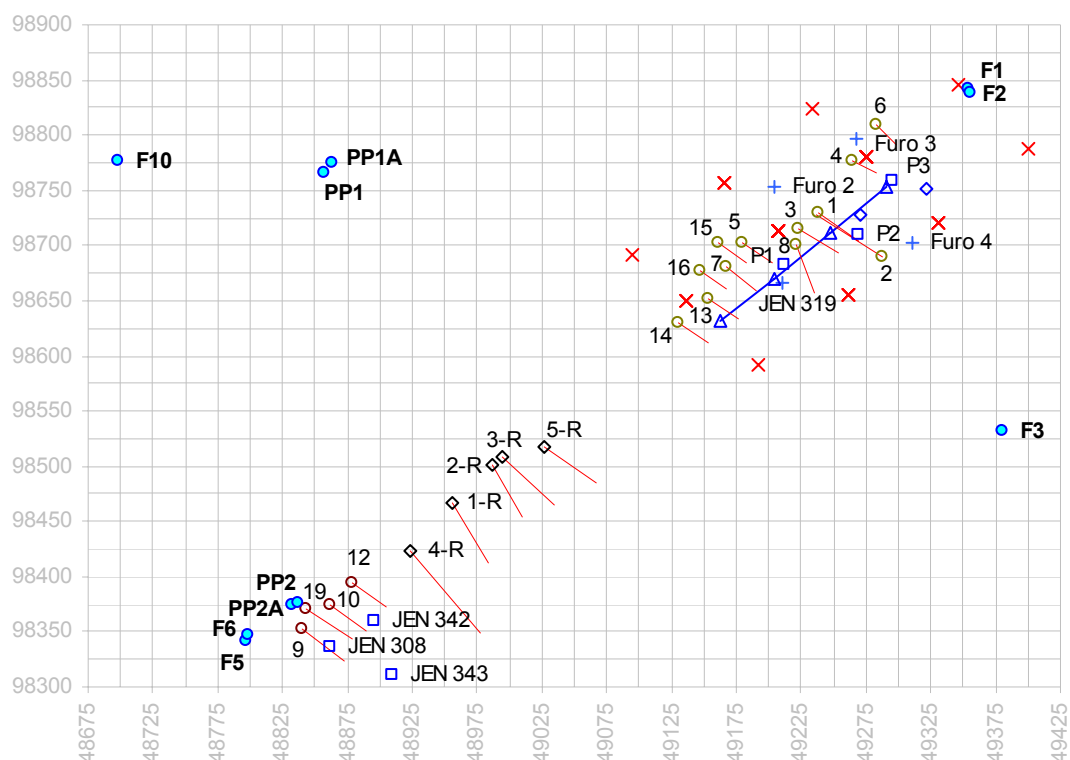


Figura 8-30 – Furos efectuados no decurso dos trabalhos de caracterização prévia da mina de Castelejo.
(A encarnado representa-se a projecção horizontal dos furos inclinados).

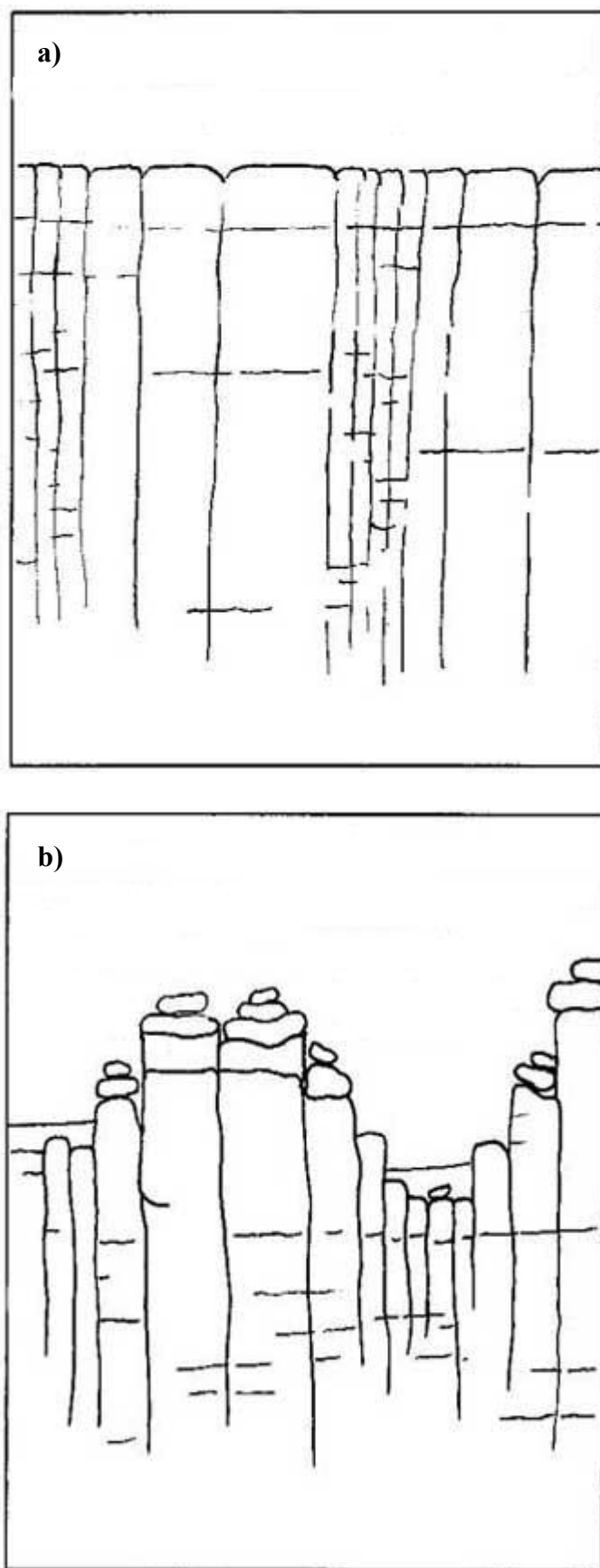
8.6.1. Modelo conceptual do local

O modelo conceptual adoptado baseia-se na alteração do granito por meteorização física e química, a qual poderá representar-se a partir dos esquemas apresentados na Figura 8-31.

Na etapa inicial, é induzida fracturação na rocha, tanto tectónica, como por descompressão, o que permite a circulação de fluidos, desenvolvendo um processo de meteorização química. [Figura 8-31 a)].

Após o alargamento das fracturas, em concorrência com processos de erosão diferencial, há lugar à formação de diversos tipos de paisagens, que integram o modelado típico das regiões graníticas – tor (torre), caos de blocos, areias graníticas [Figura 8-31 b)].

A situação da área mineira de Castelejo é típica do modelado granítico, agravada pelos intensos processos tectónicos que fizeram sentir a sua influência, designadamente as falhas



**Figura 8-31 – Processo de alteração e decomposição de um maciço granítico.
a) fase inicial; b) fase subsequente.**

Seia-Lousã, Manteigas-Vilarica-Bragança e Penacova-Régua-Verin (Figura 6-1), pelo que os principais eixos de escoamento são vales de natureza tectónica, representando possantes caixas de falha de enchimento areno-argiloso. Este tipo de paisagem, não só facilita a circulação da água, como promove a sua infiltração.

De acordo com o modelo estabelecido, deverão desenvolver-se no local dois aquíferos:

- um superficial, livre, localizado nas zonas mais meteorizadas, capas de alteração dos granitos e zonas de enchimento detrítico, correspondentes a caixas da falha;
- outro, profundo, confinado ou semi-confinado, localizado sob o primeiro, em que a circulação se processará essencialmente através das fissuras do granito praticamente são.

A infiltração deverá constituir recarga do aquífero superficial, que se encontrará separado do profundo através de uma ou mais camadas mais ou menos laminadas, mais ou menos argilosas, que funcionam como aquitardo, ainda que pontualmente possa haver lugar a trocas de águas entre os aquíferos. Com base nas diferenças registadas entre as temperaturas das águas dos furos, obtidas no decurso do ensaio de traçagem, estima-se que o aquitardo se situe a uma profundidade próxima dos 28 m, pelo menos na zona em que se situam os furos PP1/PP1A, nos quais se fundamentam tais pressupostos.

Apresenta-se na Figura 8-32 a localização de todos os furos, tantos os actualmente utilizados na monitorização, como os efectuados no âmbito dos trabalhos de prospecção preliminar da área mineira, com indicação das cotas de boca e traçado de superfícies de iso-altitudes.

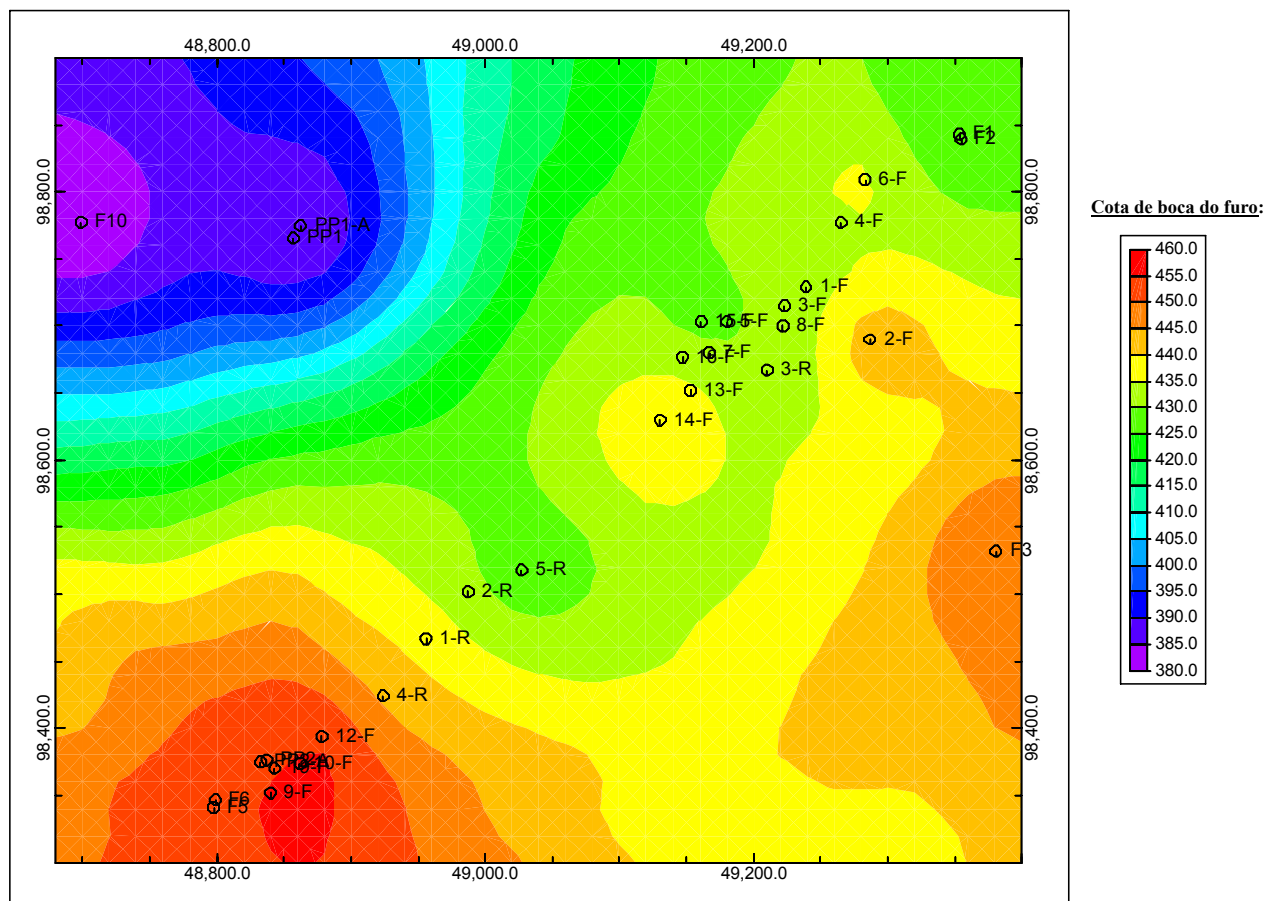


Figura 8-32 – Mapa de localização dos furos e traçado de iso-altitudes das cotas de boca.

Deve ter-se em atenção que as cotas de boca reflectem a antiga topografia existente no local, pelo que alguns dos furos representados já não existem, uma vez que se situavam sobre os actuais Céus Abertos, e outros não são visíveis, uma vez que se localizam sob escombrelas.

Na Figura 8-33 representa-se um mapa de localização dos furos referidos, assinalando-se a direcção A' - A, segundo a qual se traçou um corte geológico interpretativo, desenvolvido ao longo do vale do Castelejo, principal eixo de escoamento da área mineira.

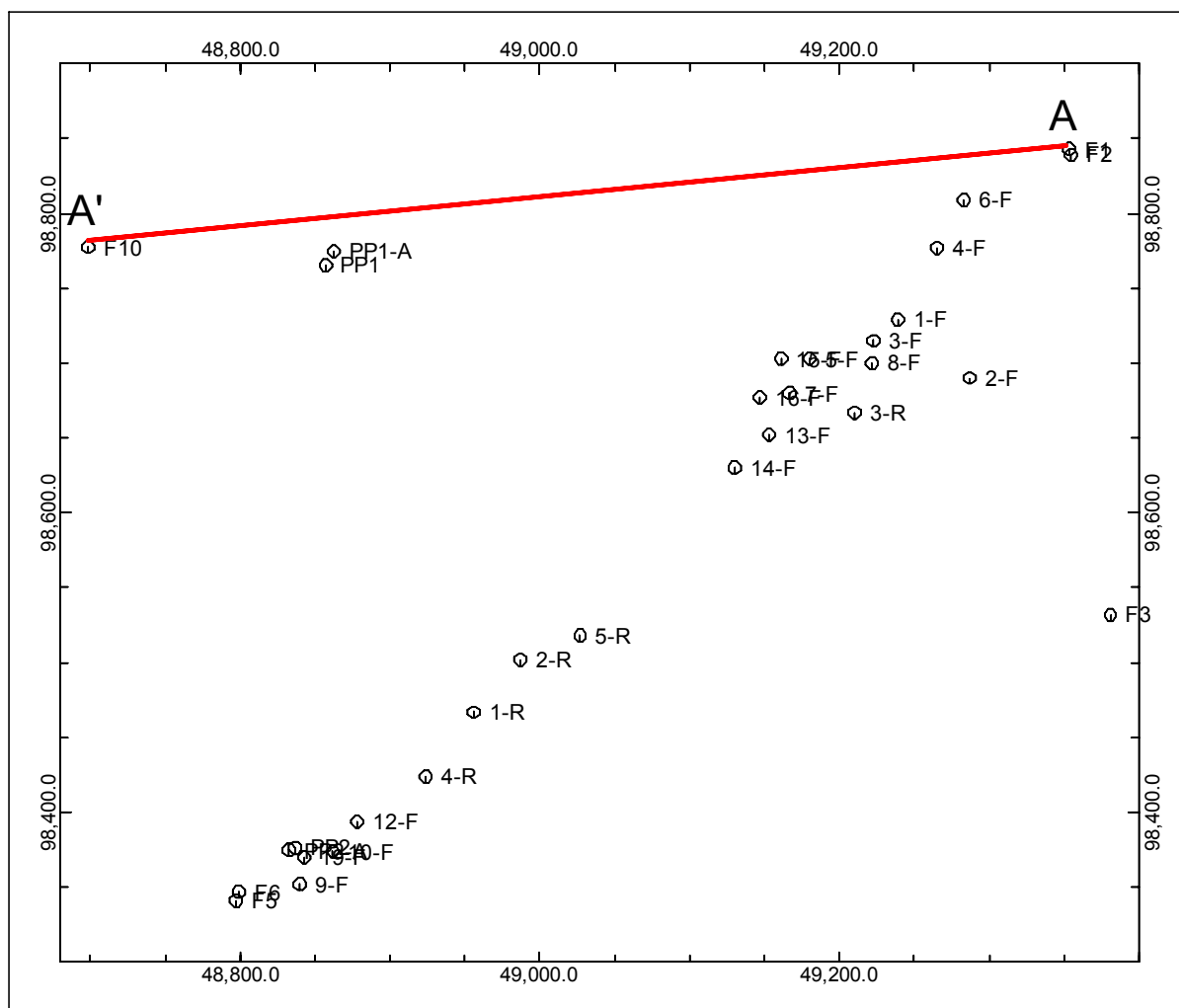
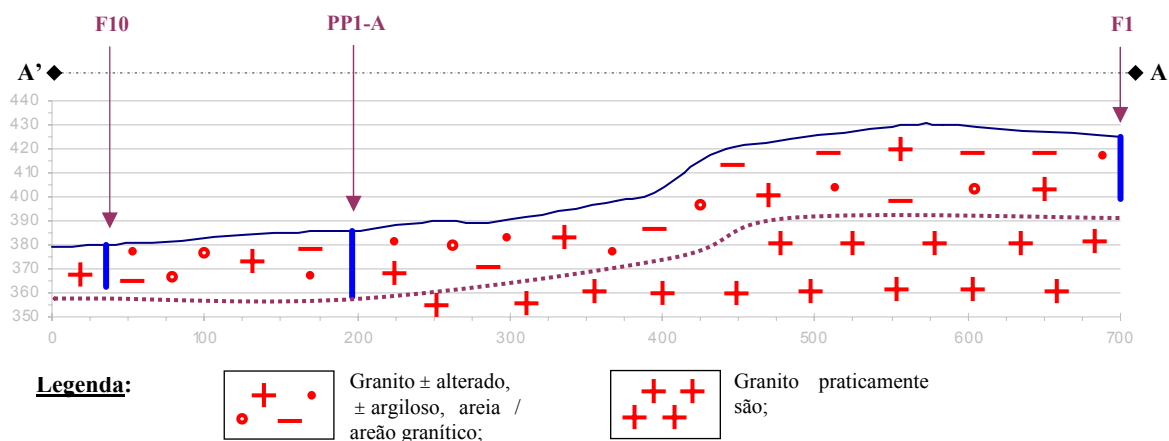


Figura 8-33 – Mapa de localização dos furos e direcção do corte geológico interpretativo.

No corte geológico apresentado na Figura 8-34 representa-se o modelo conceptual relativo à zona em estudo. O aquífero superior, entendido como aquífero livre, desenvolve-se na zona superior, desde a superfície até aproximadamente 28 m de profundidade. A zona superior é constituída por granito mais ou menos alterado, acompanhado de fracturação mais ou menos intensa. O granito pode encontrar-se mais ou menos caulizado, ou evidenciar forte grau de alteração e apresentar-se desagregado ou fragmentado, ou sob a forma de areia ou areão granítico. Pode igualmente apresentar-se esmagado, constituindo brecha de falha, ou ferruginoso, indiciando circulação de água.

O aquífero inferior, entendido como confinado ou semi-confinado, desenvolve-se na zona inferior, abaixo de 28 m de profundidade. A zona inferior é constituída por granito pouco alterado ou praticamente são. Pode exibir fracturação mais ou menos intensa, devendo a circulação da água processar-se essencialmente através das fracturas.



**Figura 8-34 – Corte geológico interpretativo segundo a direcção A'-A.
(sobreelevação $\approx 1.56 \times$)**

O corte geológico apresentado na Figura 8-34 ilustra a situação verificada na área localizada no Vale de Castelejo. A geometria do aquífero livre superficial na zona em que este apresenta a sua maior espessura acompanha, deste modo, a topografia do Vale do Castelejo.

De notar que todos os furos representados se localizam sobre fracturas ou na sua intersecção, facilitando a alteração do material, a infiltração da água e a circulação subterrânea:

- F1 localiza-se sobre a direcção N60°E, a que corresponde a estrutura mineralizada a NE do Céu Aberto I;
- PP1-A localiza-se sobre a intersecção das direcções N20°E e N75°W, a NW do Céu Aberto II;
- F10 localiza-se sobre a direcção N20°E, a NW de Castelejo II.

O modelo conceptual aplicado à zona situada no Vale do Castelejo, aponta para que o aquífero livre superficial, instalado na caixa de falha ali existente, apresente nesta zona uma espessura próxima dos 28 m.

8.6.2. Modelo de escoamento e transporte

Devido ao acidentado da topografia e ao relevo exibido, o modelo conceptual apresentado na Figura 8-34 apenas é aplicável à zona situada no Vale do Castelejo, local em que a espessura indirectamente obtida para o aquífero livre superficial é maior, ocupando os primeiros 28 m de profundidade da caixa de falha ali situada. Já em relação às colinas circundantes, a espessura estimada aponta, como seria de esperar, para valores bastante mais modestos, da ordem dos 3 m abaixo da superfície.

Por esta razão, foi decidido proceder à modelação de uma zona um pouco mais extensa da área mineira, a fim de obter uma perspectiva alargada da situação hidrogeológica existente.

A modelação matemática foi desenvolvida através do conjunto de programas Visual Modflow 2.8 que integra módulos de modelação de escoamento – MODFLOW, e de rastreio de partículas - MODPATH.

A área abrangida pelo modelo é a representada na Figura 8-35, tendo-se simulado as condições hidrogeológicas para uma área com cerca de 2.825 Km².

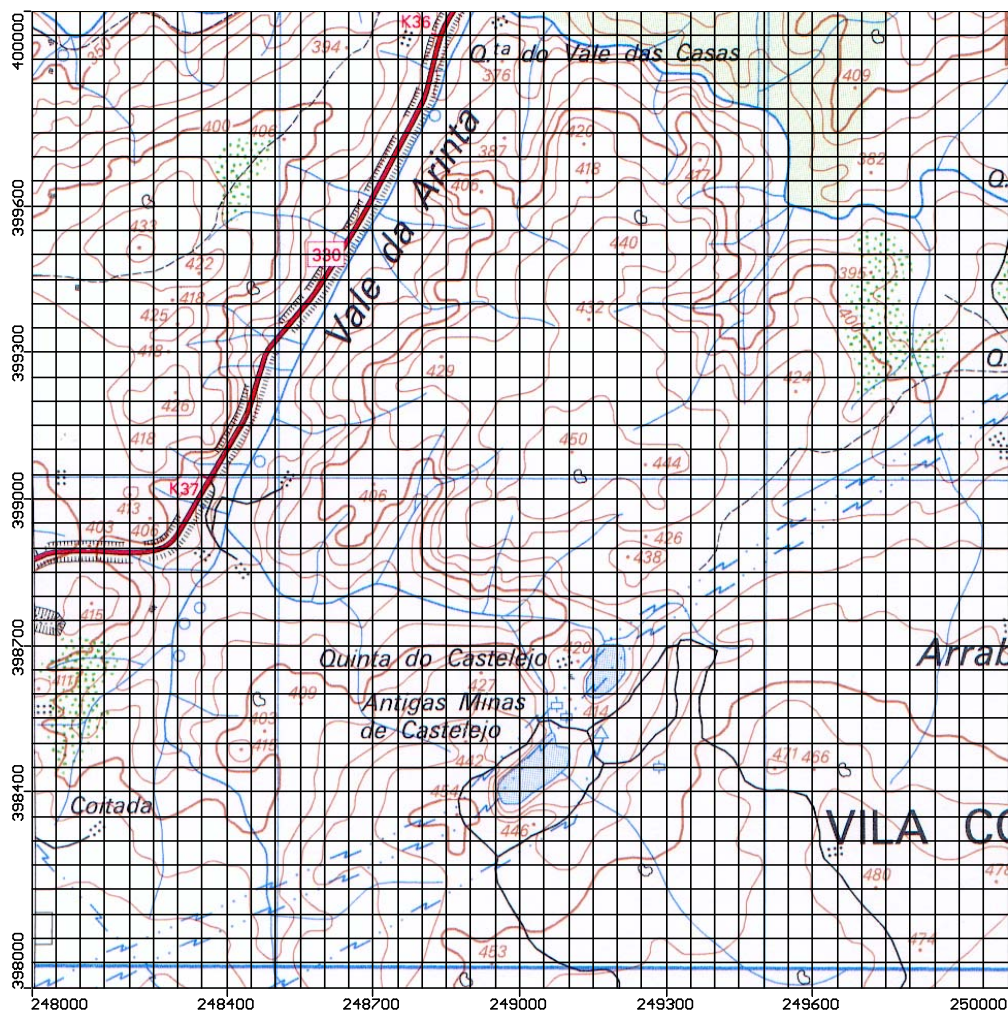


Figura 8-35 – Discretização da área estudada

O domínio foi discretizado numa malha de 40 linhas por 40 colunas, correspondendo a 1600 células quadradas, com 50 m de lado, o que equivale a uma área total de 4 Km². A diferença existente entre a área total (4 Km²) e a área modelada (2.825 Km²) corresponde a células consideradas inactivas.

A modelação foi realizada em regime de equilíbrio durante um período de 20 anos, para o modelo de escoamento e para o modelo de rastreio de partículas.

Simulou-se a existência de uma única camada “mista”, correspondente a um aquífero superficial livre (correspondente ao instalado nos granitos meteorizados do Vale do Castelejo) ou semi-confinado (correspondente ao localizado nas fracturas do granito), com uma espessura variável, definindo-se a superfície a partir das cotas do terreno e localizando-se a base na altitude de 330 m. A localização da base a 330 m permitiu obter para o aquífero uma

espessura máxima de 150 m e uma espessura mínima de 5 m, valores que se afiguram razoáveis, face à simulação de uma única camada “mista”.

Assumiui-se que, tratando-se de um aquífero livre ou semi-confinado instalado em formações permeáveis, a superfície freática acompanha de forma grosseira o modelado topográfico.

Reproduzem-se na Figura 8-36 as condições de fronteira utilizadas no modelo. A zona modelada é constituída pelo interior de um polígono definido pelo cruzamento de duas fronteiras do tipo *River* e duas fronteiras do tipo *General Head Boundary (GHB)*.

A verde escuro (Figura 8-36) representam-se as células consideradas inactivas, constituídas pelas células exteriores às fronteiras do tipo *River*.

Foram estabelecidas condições de fronteira do tipo *General Head Boundary* (a verde na Figura 8-36) nas células que constituem os limites Este e Sul do modelo, respeitando as cotas da superfície topográfica.

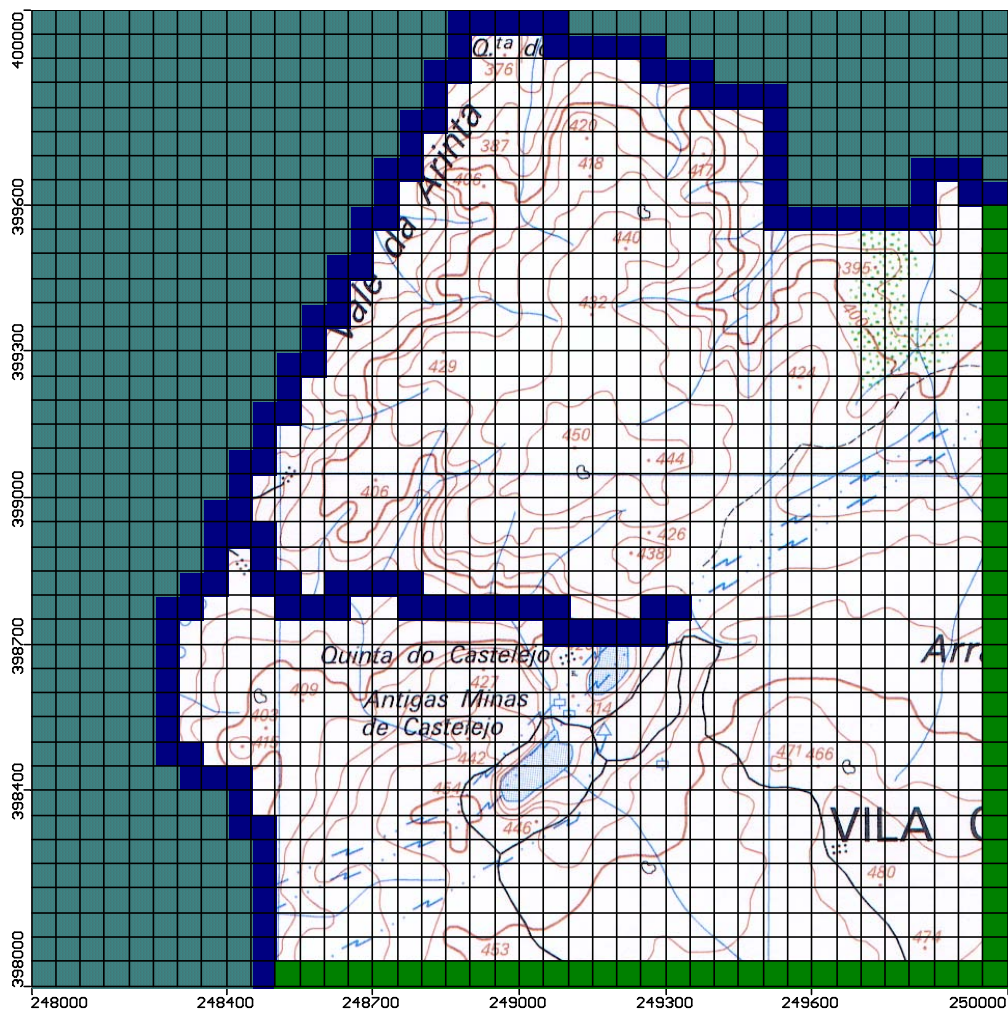


Figura 8-36 – Condições de fronteira utilizadas no modelo.

Nas células que constituem os demais limites do modelo foram estabelecidas fronteiras do tipo *River* (a azul na Figura 8-36). Assim, temos células do tipo *River* na fronteira NE, correspondente ao Ribeiro do Paço e em toda a fronteira W, correspondente à linha de água instalada no Vale de Arinta.

Foram ainda impostas condições de fronteira do tipo *River* nas células localizadas na linha de água existente no Vale de Castelejo.

Todas as fronteiras do tipo *River* acompanham as cotas de base das linhas de água a que respeitam.

Às células de fronteira foi atribuída uma condutância variável, entre 100 m²/dia e 500 m²/dia (*GHB* e *Rivers*) representando a entrada, ou saída, de água no sistema através desses limites.

Não foram consideradas extracções do sistema aquífero, dado não se verificarem na zona em apreço.

Considerou-se uma recarga directa, a partir da precipitação, de 70 mm/ano, o que representa cerca de 10 % da precipitação média anual na região (≈ 692 mm/ano na estação de Mesquitela, a mais próxima da zona estudada) valor considerado razoável face à litologia e vegetação presentes.

8.6.2.1. Modelo de escoamento

Na Tabela 8-3 apresentam-se os valores dos parâmetros que permitiram ajustar o modelo às condições conceptualizadas para o aquífero.

Parâmetros	Valores
Condutividade hidráulica horizontal, $K_x = K_y$ (m/s)	1×10^{-7}
Condutividade hidráulica vertical, K_z (m/s)	1×10^{-8}
Armazenamento específico, S_s (1/m)	0.0001
Cedência específica, S_y	0.1
Porosidade efectiva	0.1
Porosidade total	0.2

Tabela 8-3 – Parâmetros utilizados na modelação.

Na Figura 8-37 apresentam-se os resultados da calibração do modelo, expressos através da recta de calibração, dada pela projecção dos valores calculados face aos valores observados. Os valores observados são relativos a Setembro de 2008.

A calibração permitiu, entre outros parâmetros, determinar a direcção do escoamento em toda a área modelada, e em particular nas imediações da área mineira.

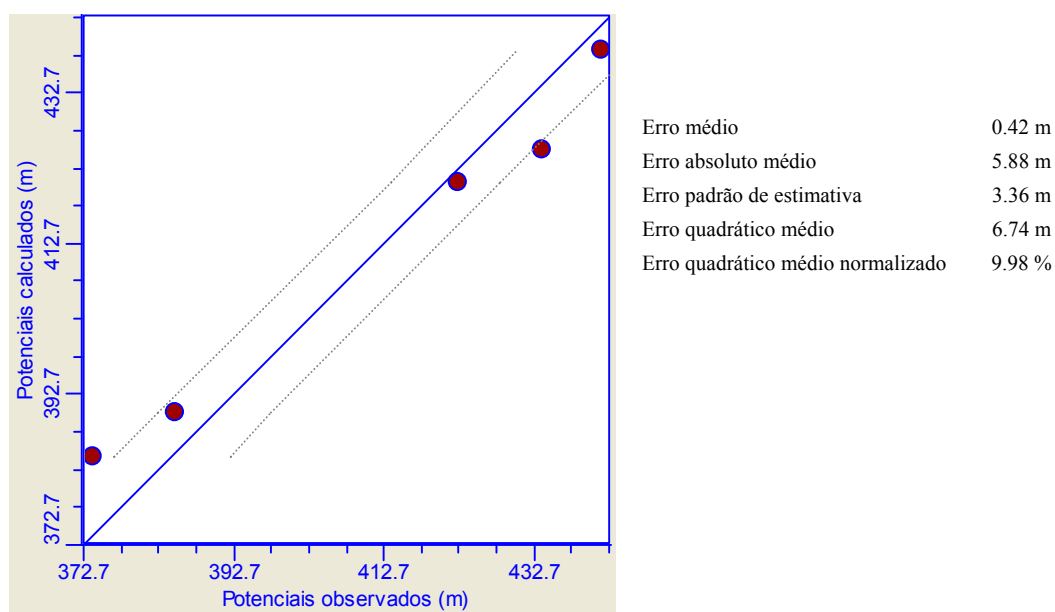


Figura 8-37 – Recta de calibração do modelo matemático.

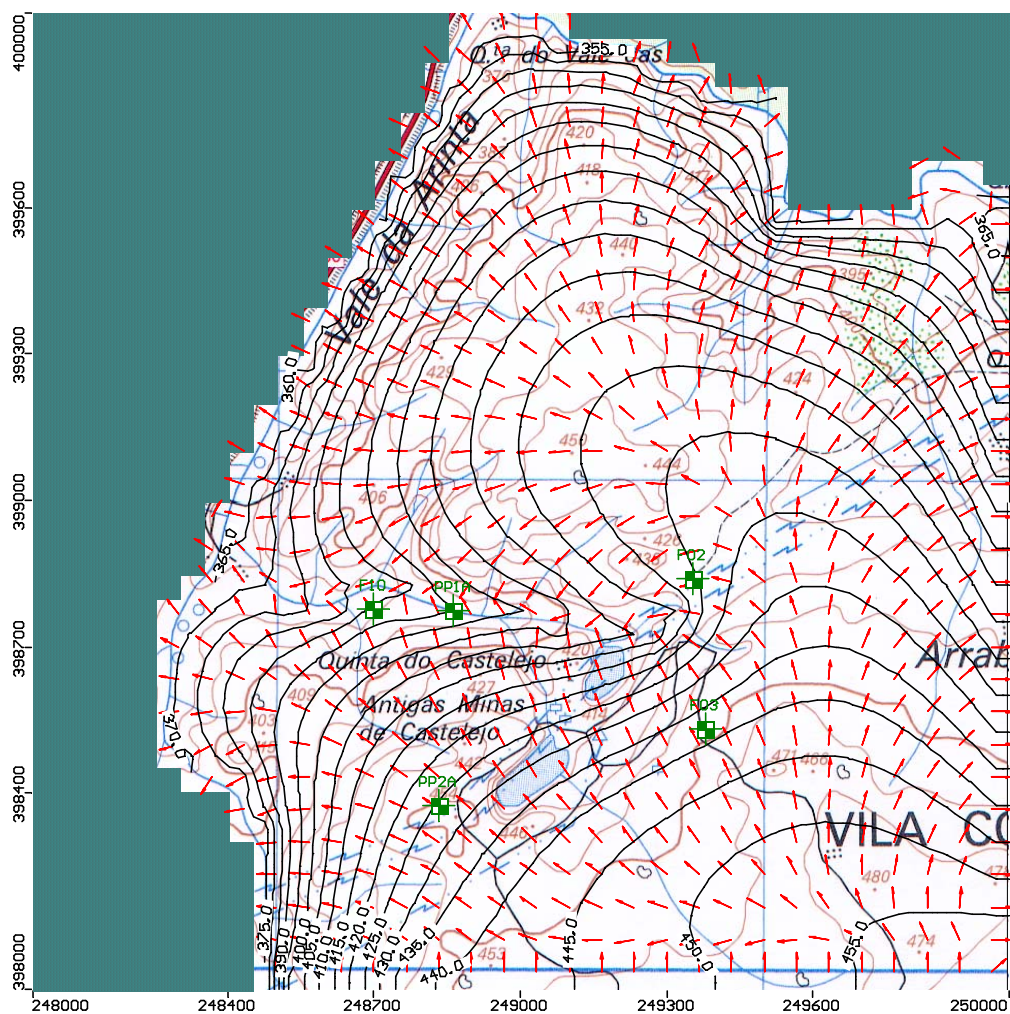


Figura 8-38 – Escoamento subterrâneo na área modelada.

O modelo de fluxo assim obtido apresenta-se na Figura 8-38. Nesta figura, pode ver-se que o fluxo segue aproximadamente a tendência geral da topografia, sendo que a principal direcção de escoamento, a partir da antiga área mineira, se dirige para NW, no sentido do Vale de Castelejo.

Indicam-se na Figura 8-38 os pontos de água utilizados na calibração, onde tiveram lugar as medições de níveis e/ou amostragens efectuadas no decurso do presente trabalho.

Na Figura 8-38 representam-se igualmente os vectores velocidade da água, permitindo uma melhor interpretação das direcções de escoamento na área estudada.

8.6.2.2. Modelo de transporte

Os dados obtidos através do modelo de escoamento foram seguidamente utilizados no módulo de rastreio de partículas MODPATH.

Realizou-se a simulação da trajectória seguida por um contaminante conservativo, não adsorvente ou reactivo, com origem no Céu Aberto II, local onde teve lugar o processo de lixiviação ácida efectuada no sentido de recuperar o urânio lixiviado a partir do minério pobre para ali transportado.

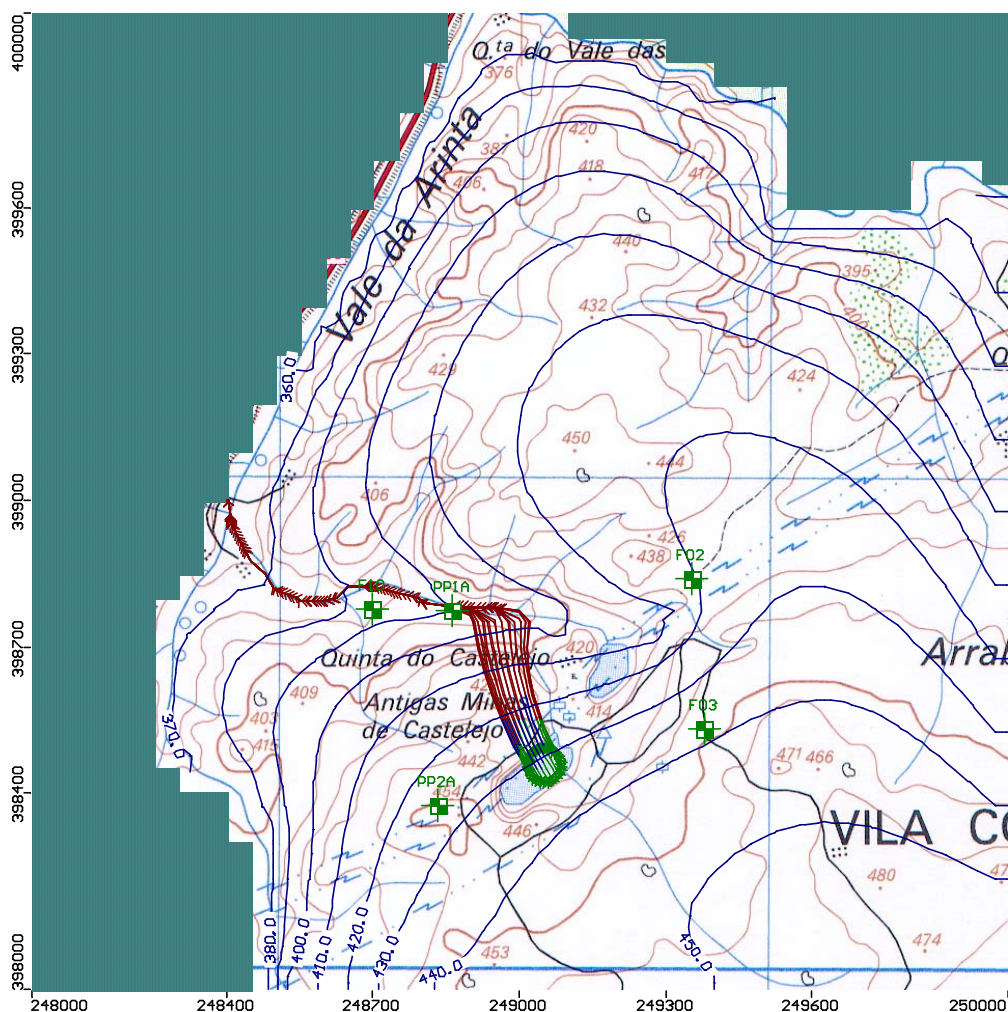


Figura 8-39 – Escoamento subterrâneo e trajectória das partículas na área modelada.

Embora o contaminante em apreço seja o urânio, isto é, um metal não conservativo, susceptível de sofrer adsorção na superfície de outras substâncias e também degradação radioactiva (Fetter, 1993), o rastreio de partículas foi efectuado para um contaminante conservativo, não adsorvente ou reactivo, uma vez que seria difícil reproduzir as condições de campo, em que a propagação da contaminação parece ter-se processado essencialmente através da fracturação existente nos granitos da área mineira e não em meio poroso, conforme simulado pelo modelo. Por outro lado, tratando-se a injeção de contaminante de um processo contínuo, são desconhecidas, tanto as concentrações iniciais, como as ainda presentes nos poços de lixiviação do Céu Aberto II, tornando pouco rigorosas eventuais estimativas das quantidades de urânio presentes no maciço rochoso ainda mobilizáveis.

Para uma simulação em regime de equilíbrio, pode ver-se a tendência do trajecto a efectuar pelas partículas ao longo de intervalos de tempo sucessivamente crescentes. Na Figura 8-40 apresenta-se um corte longitudinal (N-S) da área mineira, que inclui o Furo PP1A e ilustra a trajectória das partículas segundo esta direcção.

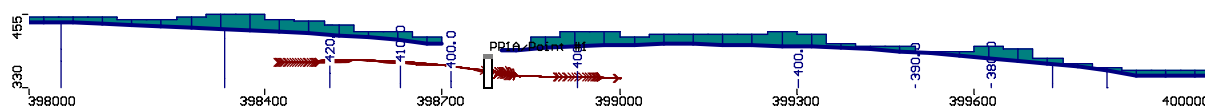


Figura 8-40 – Corte longitudinal (direcção N-S) ilustrando a trajectória das partículas na área modelada.

A trajectória das partículas segundo a direcção E-W é exibida na Figura 8-41, onde se apresenta um corte transversal da área mineira que inclui os Furos PP1A e F10.

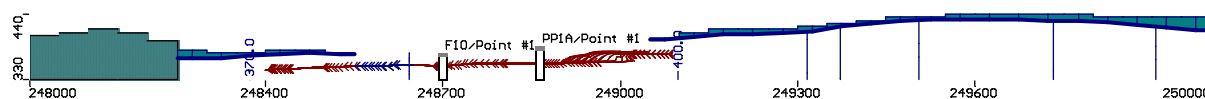


Figura 8-41 – Corte transversal (direcção E-W) ilustrando a trajectória das partículas na área modelada.

9. Comportamento químico do Urânio

9.1. Características químicas dos metais

Na Figura 9-1 representa-se a tabela periódica dos elementos. Todos os elementos são metais (a branco) e metalóides (a azul), com excepção dos gases raros e do H, B, C, N, O, F, P, S, Cl, Br, I e At (assinalados a rosa). Os metalóides são os Si, Ge, As, Se, Sb e Te.

O H exhibe propriedades metálicas como ácido de Lewis (H^+) e propriedades não-metálicas como base de Lewis (H^-) - as bases de Lewis funcionam como dadores de electrões e os ácidos de Lewis como receptores de electrões (note-se que, segundo Brönsted, os ácidos são dadores de protões).

Os Grupos IA e IIA, metais de “*bloco s*” (metais de “*bloco s*” são aqueles que pertencem aos grupos cujos elementos possuem o electrão de mais alta energia na orbital *s*, sendo que as orbitais *s* comportam até 2 electrões) formam catiões monovalentes (metais alcalinos) e divalentes (metais alcalino-terrosos), no sentido de obterem a estrutura do gás raro que os antecede.

Os Grupos IIIB até VIIB contêm os metais de “*bloco p*” (metais de “*bloco p*” são aqueles que pertencem aos grupos cujos elementos possuem o electrão de mais alta energia na orbital *p*, sendo que as orbitais *p* comportam até 6 electrões). Entre estes encontra-se o Al, o qual no estado de oxidação Al^{3+} , apresenta a configuração do Ne. A configuração do gás raro para iões metálicos encontra-se associada a uma maior simetria esférica, que não é facilmente deformada por campos eléctricos, pelo que estes funcionam quase como “esferas rígidas”.

Os elementos de transição têm entre 0 e 10 electrões de “*bloco d*” (metais de “*bloco d*” são aqueles que pertencem aos grupos cujos elementos possuem o electrão de mais alta energia na orbital *d*, sendo que as orbitais *d* comportam até 10 electrões). A primeira série de transição vai do Sc (21) até ao Zn (30). A segunda vai do Y (39) até ao Cd (48). A terceira do La (57) até ao Hg (80).

À medida que a primeira série de transição é atravessada, os 5 electrões (das orbitais *d* e *s*) do Mn^{2+} representam uma tendência relativamente fraca para ligação covalente, como acontece com o Zn^{2+} no fim da série. Geralmente, o carácter covalente das ligações aumenta da esquerda para a direita nos metais de transição.

Os grupos de elementos que pertencem ao “*bloco f*” (metais de “*bloco f*” são aqueles que pertencem aos grupos cujos elementos possuem o electrão de mais alta energia na orbital *f*, sendo que as orbitais *f* comportam até 14 electrões) são todos metais da série de transição interna. São os lantanídeos, que vão do La (57) até ao Lu (71), bem como os actinídeos, que vão do Ac (89) até ao Lr (103). Os lantanídeos, com a sua capacidade para formar iões $^{3+}$, evidenciam forte apetência pelo estabelecimento de ligações de carácter iónico e fraca apetência por ligações de carácter covalente.

Os metais são libertados para a atmosfera, tanto em partículas, como em vapores, como resultado da combustão de combustíveis fósseis (carvão, petróleo) e também, entre outras causas, das indústrias associadas à metalurgia extractiva.

Período	Grupo IA	Grupo IIA	Grupo IIIA	Grupo IVA	Grupo VA	Grupo VIA	Grupo VIIA	Grupo VIIIA			Grupo IB	Grupo IIB	Grupo IIIB	Grupo IVB	Grupo VB	Grupo VIB	Grupo VIIB	Grupo 0
1 1s	1 H																	2 He
2 2s 2p	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3 3s 3p	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4 4s 3d 4p	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5 5s 4d 5p	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6 6s (4f) 5d 6p	55 Cs	56 Ba	57* La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7 7s (5f) 6d	87 Fr	88 Ra	89** Ac															

*Lantanídeos 4f	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
**Actinídeos 5f	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Figura 9-1 – Tabela periódica dos elementos.

Legenda:

	Metais
	Metalóides
	Não metais

Os elementos são designados de atmófilos quando a massa transportada através da atmosfera é superior à transportada através dos cursos de água. Muitos dos elementos atmófilos são voláteis e têm óxidos metálicos de ponto de ebulição relativamente baixo. É sabido que os metais de tipo-B – metais que apresentam estrutura “flexível”, de baixa electronegatividade e alta polarizabilidade – podem ser metilados, isto é, admitir metilação ou adição de grupos metil (CH₃) e ser libertados na atmosfera como vapores.

Por outro lado, os metais de tipo-A – metais que apresentam estrutura “rígida”, de baixa polarizabilidade, dispendo os electrões numa nuvem esférica cerrada em torno do núcleo e formando catiões com tendência para gás raro – são designados de litófilos, uma vez que o transporte da sua massa para os oceanos através dos rios ou outros cursos de água é superior ao seu transporte através da atmosfera.

Foram efectuadas diversas avaliações das taxas de transferência de metais. Apesar de diversas incertezas, foi possível concluir que os metais Cu, Zn, Ag, Sb, Sn, Hg e Pb (Tabela 9-1) são os que potencialmente implicam mais riscos para o ambiente numa escala global ou regional. Na tabela, a escala global deve ser entendida como aquela em que o efeito de perturbação pode ser demonstrado, pelo menos em grandes extensões do hemisfério norte.

Elemento	Escala de perturbação			Ambientes de diagnóstico	Mobilidade	Problemas de saúde	Via de propagação crítica
	Global	Regional	Local				
Cu	(-)	+	+	A, Sd, W, So	v,s	E	F ?
Zn	(-)	+	+	A, Sd, W, So	v,s	E	F
Ag	(-)	+	+	A, Sd, W	(v)	(+)	?
Sb	(-)	+	+	A, Sd	v,s	(+)	F, W, A ?
Sn	(-)	+	+	A, Sd, W	v,a	+ ^a	F
Hg	(-)	+	+	A, Sd, Fish, So	v,a	+ ^a	F, (A)
Pb	+	+	+	A, Sd, I, W, H, So	v,a	+	F, A ^c
U	-	c	+	A, So, Gw	s	(+)	A, W

Tabela 9-1 – Perturbações dos ciclos geoquímicos dos metais pela sociedade.

Legenda:

Escala de perturbação: - sem perturbação; + perturbação significativa; c reforçada devido à mobilização de materiais crustais (solo, pó);

Diagnósticos ambientais: A ar; Sd sedimentos (costeiros, de lago); W águas superficiais; Gw águas subterrâneas; So solo; I carotes de gelo; H humanos; Fish peixes;

Mobilidade: v volátil; s solúvel; a móvel como espécie organo-metálica alquilada (com radicais alquilo);

Problemas de saúde: + tóxico em excesso; + ^a tóxico em excesso, apenas as formas organo-metálicas; a móvel como espécie organo-metálica alquilada (com radicais alquilo); E essencial, mas tóxico em excesso;

Via de propagação crítica: F comida; W água; A ar; A ^c Exposição através do circuito mãos-boca crítica em crianças; ? sem informação suficiente;

NOTA: Entre parêntesis assinalam-se as tendências obtidas com base em poucos dados.

Quanto ao U, como metal de interesse para o presente estudo, pode ver-se que a influência geográfica por si exercida se apresenta significativa a nível local, podendo regionalmente ser reforçada devido à mobilização de materiais crustais. Os meios que funcionaram como ambientes de diagnóstico foram o ar, o solo e a água subterrânea.

A mobilidade do U associa-se com a de um material solúvel, colocando, a nível de saúde, problemas de excesso de toxicidade, embora os resultados se baseiem em poucos dados. As suas vias de propagação críticas são o ar e a água.

No sentido de uma melhor compreensão das propriedades químicas dos sistemas aquáticos, estes devem ser caracterizados em termos dos iões maiores, estado de oxidação-redução, componentes ácido-base, iões menores, componentes complexantes, e superfícies de adsorção.

A sedimentação de partículas, especialmente bio-orgânicas, desempenha um importante papel na ligação e transferência de metais pesados para as águas mais profundas dos lagos e oceanos, onde são parcialmente mineralizados e transformados em sedimentos. O ciclo de partículas nos lagos e oceanos é fundamentalmente conduzido pela produção fotossintética de plâncton. As superfícies biológicas são especialmente eficazes na limpeza de metais pesados, provavelmente melhores do que as superfícies minerais.

O particionamento dos metais entre as partículas e a água é influenciada, por um lado, pela afinidade do metal pela superfície da partícula e, por outro lado, pela especiação química do metal na solução, isto é, pela sua afinidade pelos ligantes do soluto.

Nos oceanos e lagos, os efeitos das partículas na regulação dos iões metálicos é muito pronunciada, porque a sedimentação contínua actua como uma correia de transmissão no transporte dos elementos reactivos.

O particionamento dos metais e outros elementos reactivos entre as partículas e a água é o parâmetro-chave no estabelecimento dos tempos de residência e da concentração residual destes elementos nos lagos e oceanos.

9.1.1. Radioactividade

O núcleo do átomo é formado essencialmente por protões e neutrões. O número de protões no núcleo designa-se por número atómico e é o responsável pela individualização dos diversos elementos químicos existentes na natureza.

O número de neutrões no núcleo pode variar, uma vez que os mesmos não possuem carga associada. No entanto, como têm massa, um mesmo elemento poderá apresentar massas diferentes, de acordo com o número de neutrões que tenha no núcleo, sendo conhecidos por isótopos os átomos dum mesmo elemento que possuem massas diferentes.

O urânio, que possui 92 protões no núcleo, existe na natureza sob a forma de 3 isótopos diferentes:

- U 234, com 142 neutrões;
- U 235, com 143 neutrões;
- U 238, com 146 neutrões;

Há alguns anos, descobriu-se que alguns elementos pesados possuíam núcleos muito energéticos, seja por excesso de partículas, seja por excesso de carga. Estes núcleos tendem a estabilizar-se, emitindo partículas.

Existem vários processos de estabilização de um núcleo:

- Emissão de uma partícula alfa (α)

As partículas alfa correspondem ao núcleo de hélio, isto é, a emissão de uma partícula α corresponde à emissão de dois prótons e dois neutrões, bem como da energia a eles associada.

- Emissão de uma partícula beta (β)

Se existir no núcleo um excesso de neutrões sobre os prótons, um neutrão converte-se num próton e sucede-se a emissão de um electrão (partícula β ou partícula β negativa).

Se, pelo contrário, existir no núcleo um excesso de prótons sobre os neutrões, um próton converte-se num neutrão e sucede-se a emissão de uma partícula β positiva (positrão).

- Emissão de radiação gama (γ)

Acontece normalmente após ter lugar a emissão de uma partícula alfa ou de uma partícula beta, situação em que o núcleo emite o excesso de energia que ainda possui em forma de radiação electromagnética, designada de radiação γ .

Unidade	Significado	Conversão
Bq (Becquerel)	Uma desintegração por segundo de um isótopo radioactivo	1 Bq = 27 pCi
Ci (Curie)	Actividade de 1 g de rádio: 3.7×10^{10} desintegrações por segundo	1 Ci = 3.7×10^{10} Bq
pCi.l ⁻¹ (pico-Curie por litro)	Actividade específica de um isótopo radioactivo medida na água	1 pCi.l ⁻¹ = 37 Bq.m ⁻³
R (Roentgen)	Radiação requerida para produzir uma unidade de carga electrostática num centímetro cúbico de ar seco	1 R.min ⁻¹ = 1 Ci
Dose de radiação = Efeitos biológicos da desintegração nuclear		
Gy (Gray)	Dose de radiação absorvida, correspondente a 1 Joule de radiação absorvida por kilograma de tecido	1 Gy = 100 rad 1 Gy = 1 J.Kg ⁻¹
Sv (Sievert)	Dose de radiação absorvida medida em Gray multiplicada por um factor de qualidade para o tipo de radiação e um factor de ponderação para o tecido irradiado; unidade que descreve os danos nos tecidos	1 Sv = 100 Rem
Rem (Roentgens equivalent in man)	Radiação ionizante igual aos danos nos seres humanos de um Roentgen de raios-X de alta voltagem	1 Rem = 0.01 Sv
Rad (radiation absorbed dose)	Dose absorvida de radiação por unidade de massa	1 Rad = 0.01 J.Kg ⁻¹

Tabela 9-2 – Unidades de medida de radioactividade, dose de radiação e respectiva conversão.

Os radioisótopos, isto é, núcleos instáveis de um mesmo elemento químico, com massas diferentes, transformam-se uns nos outros de modo imprevisível, não sendo possível determinar com exactidão em que momento determinado núcleo irá emitir radiação.

No entanto, atendendo à grande quantidade de átomos presentes numa amostra, é possível prever qual a quantidade expectável de transformações por unidade de tempo, ou seja, a actividade da amostra.

A actividade de uma amostra radioactiva mede-se nas unidades apresentadas na Tabela 9-2.

As transformações dos núcleos radioactivos processam-se no sentido de se irem obtendo átomos sucessivamente mais estáveis ou, o que é o mesmo, átomos sucessivamente menos instáveis.

Estas transformações sucessivas fazem parte de um processo conhecido como desintegração ou decaimento radioactivo, transmitindo a ideia de uma diminuição gradual da massa e actividade dos átomos.

O tempo necessário para que determinado elemento radioactivo reduza a metade a sua actividade inicial, é designado por período de semi-vida desse elemento.

Desta forma, cada elemento decai emitindo radiação alfa, beta ou gama, transformando-se noutro que repete o processo de decaimento, até que por fim se atinja uma configuração estável.

Esta sequência de decaimento denomina-se de série radioactiva.

Na natureza, apenas existem três séries radioactivas naturais. São elas a série do Urânio, a série do Actínio e a série do Tório.

A série do Actínio inicia-se, não com este elemento, mas sim com o ^{235}U . Todas elas terminam em isótopos estáveis do Chumbo, respectivamente, ^{206}Pb , ^{207}Pb e ^{208}Pb .

Nas Figuras 9-2, 9-3 e 9-4 apresentam-se as cadeias de decaimento das famílias do ^{238}U , do ^{235}U e do ^{232}Th .

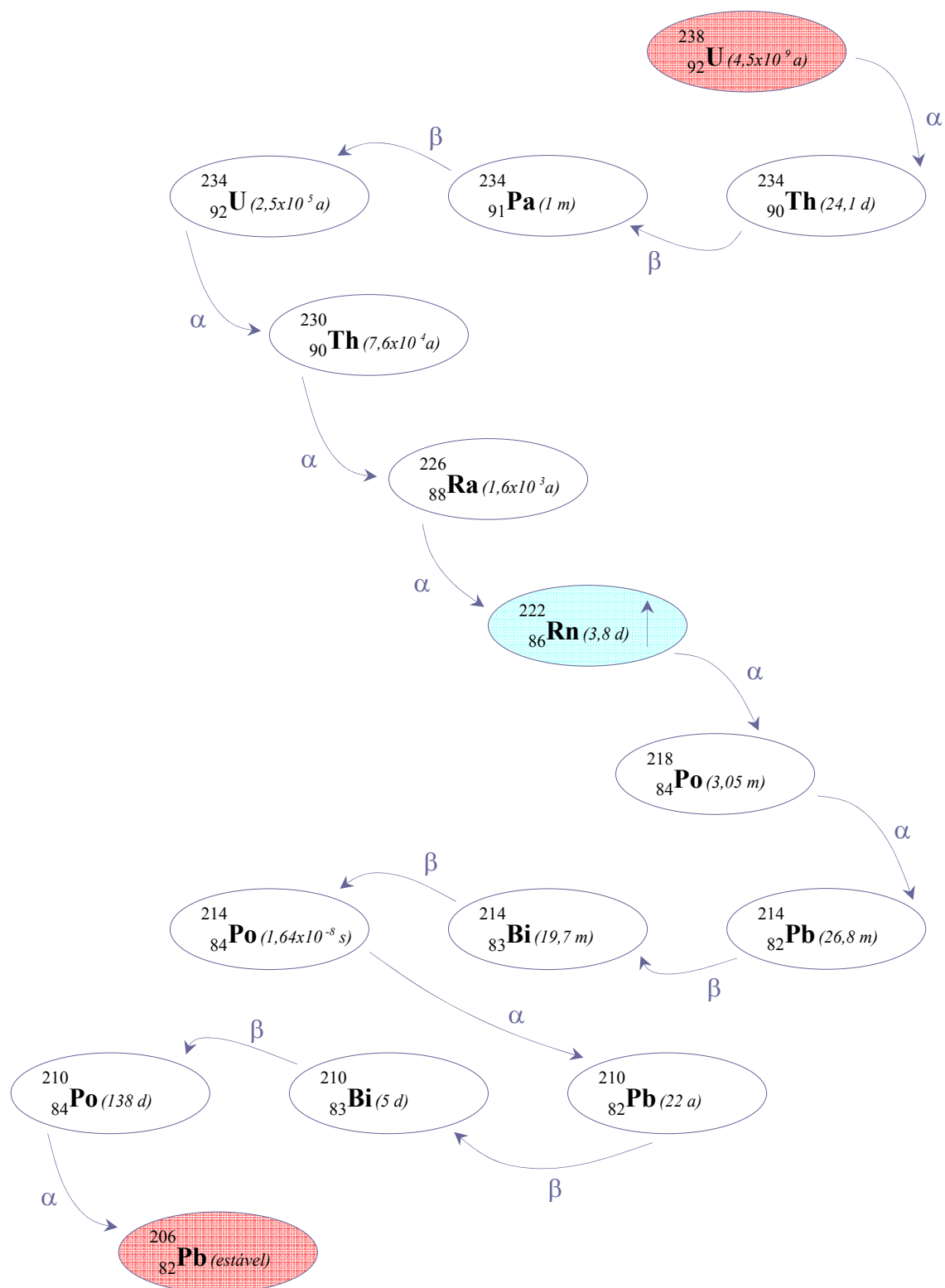


Figura 9-2 – Cadeia de decaimento do ^{238}U , com indicação dos períodos de semi-vida (simplificada). (termos inicial e final a encarnado, gás a azul, a - anos, d - dias, m - minutos, s - segundos).

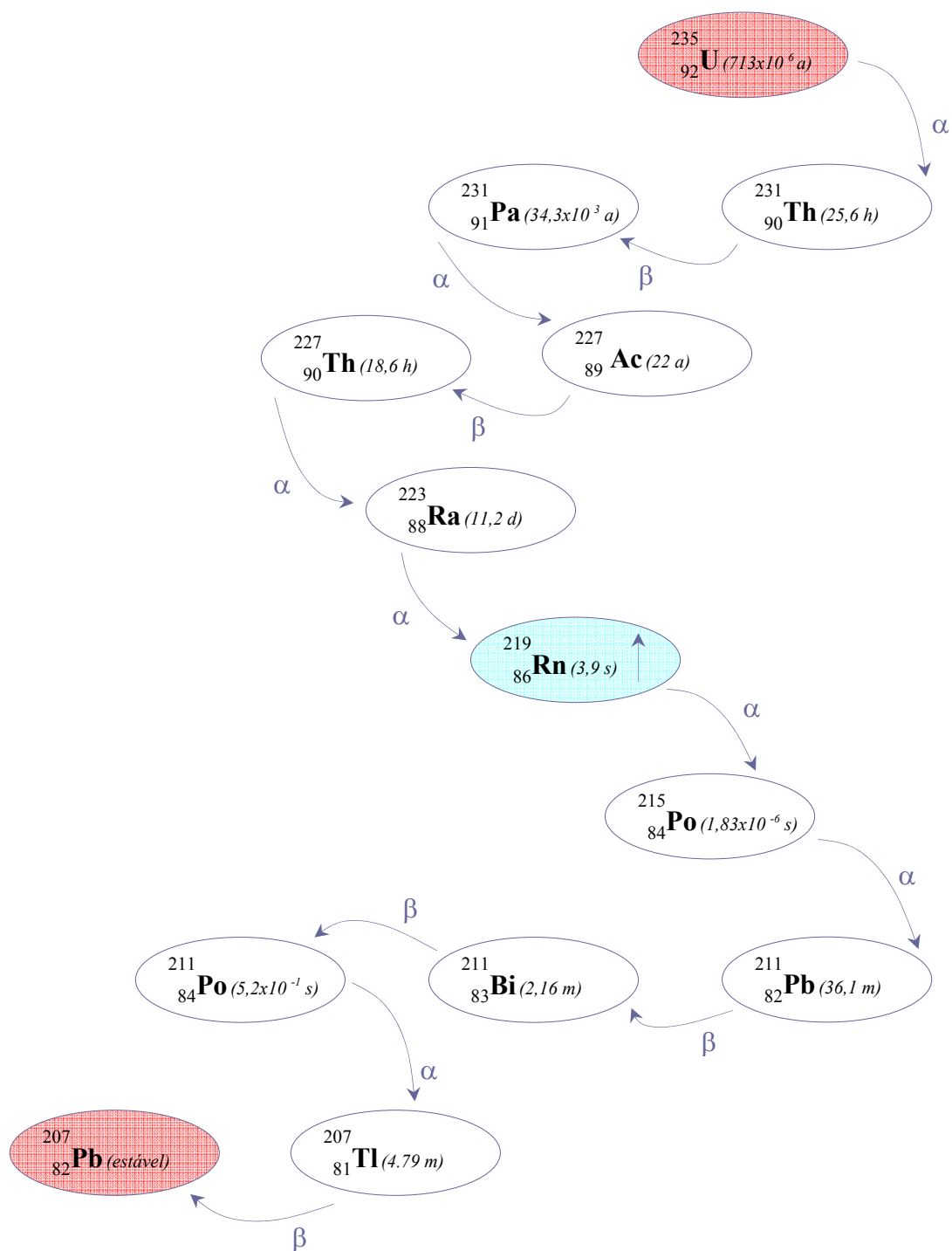


Figura 9-3 – Cadeia de decaimento do ^{235}U , com indicação dos períodos de semi-vida (simplificada). (termos inicial e final a encarnado, gás a azul, a - anos, d - dias, h - horas, m - minutos, s - segundos).

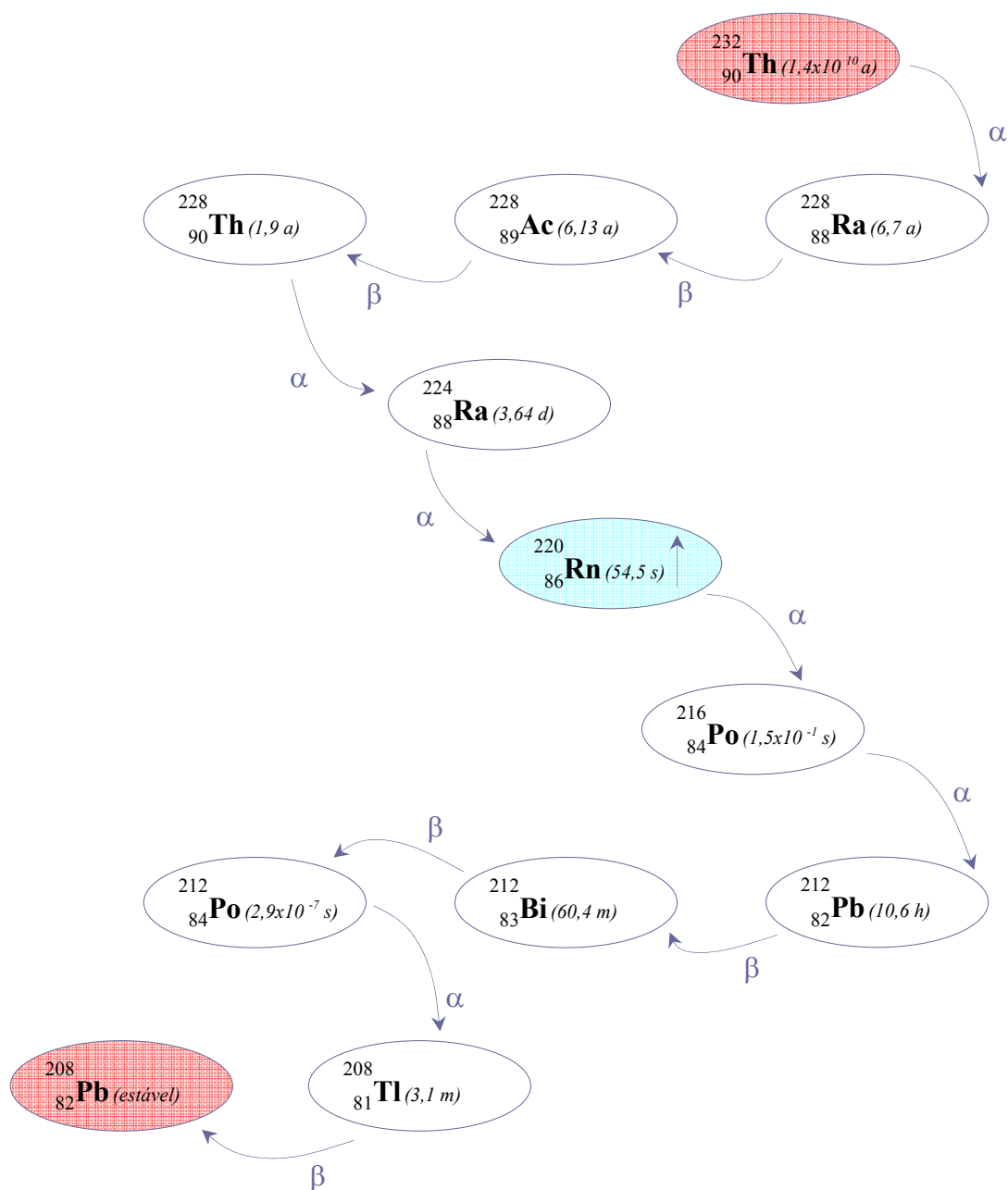


Figura 9-4 – Cadeia de decaimento do ^{232}Th , com indicação dos períodos de semi-vida (simplificada). (termos inicial e final a encarnado, gás a azul, a - anos, d - dias, h - horas, m - minutos, s - segundos).

Da análise das figuras vê-se que alguns elementos têm um período de semi-vida muito elevado (são os casos dos primeiros termos de cada série, ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th). Sendo a proporção aproximada de U na natureza a que se segue, $^{238}\text{U}=99.28 \%$, $^{235}\text{U}=0.71 \%$ e $^{234}\text{U}=0.006 \%$, explica-se assim por que razão existe uma percentagem tão baixa de ^{235}U relativamente ao ^{238}U : como o ^{235}U tem um período de semi-vida muito mais curto do que o ^{238}U , aquele decai muito mais rapidamente do que este, existindo, portanto, em muito menor quantidade do que o segundo.

As mesmas razões justificam a ainda menor percentagem de ^{234}U relativamente aos outros dois isótopos.

9.2. Geoquímica do Urânio

O urânio natural, o quarto membro dos actínídeos (figura 9-1) tem o número atómico 92 e uma massa atómica de 238.04. É um metal pesado, com densidade de 18.9 g.cm^{-3} , de cor branco-prateado, com ponto de fusão de 1132°C e ponto de ebulição de 3818°C . Quando finamente dividido, entra em combustão espontânea.

Os estados de oxidação variam do +2 até ao +6. Em solução aquosa, o catião UO_2^{2+} é a forma mais estável.

As propriedades químicas do urânio são próximas das das terras raras (Sc, Y e lantanídeos). Os seus óxidos são insolúveis em água e álcalis, mas dissolvem-se em ácidos.

O conteúdo de urânio de uma amostra pode determinar-se através de fluorometria, espectrometria alfa, activação neutrónica, micro-análise de raios-X com microscópio electrónico de varrimento, espectrometria de massa e voltametria de redissolução catódica.

Todos os produtos de decaimento, com os seus relativamente curtos períodos de semi-vida resultando em alta radioactividade específica (ou seja, alto número de decaimentos por segundo e por unidade de massa) são melhor identificados e medidos através de espectrometria alfa e gama. Quantidades muito reduzidas do gás ^{222}Rn e dos seus produtos de decaimento de vida curta podem determinar-se utilizando detectores de radiação.

A crosta terrestre contém cerca de 2.4 ppm de urânio, contendo a água do mar aproximadamente de 1 a 3 ppb. As concentrações típicas de urânio variam entre 1 a 10 ppm em arenitos, xistos ou calcários, enquanto que os granitos contêm até 15 ppm.

A solubilidade na água e, conseqüentemente o comportamento migratório do urânio na litosfera e o seu potencial para a poluição da água, encontram-se fortemente dependentes da presença de ligantes orgânicos e do seu estado de oxidação. O Urânio (IV) que se encontra presente sob condições anóxicas tem uma solubilidade muito menor que o Urânio (VI).

A maior parte do urânio natural é extraído para fins de produção de energia em reactores de fissão. Embora o urânio possua três isótopos naturais, para fins nucleares apenas o ^{235}U produz energia aproveitável, quando o núcleo se desintegra.

O urânio enriquecido (^{235}U) é utilizado para fins militares, quer em bombas de fissão, quer para incendiar bombas de hidrogénio. Outras aplicações menores envolvem o uso de urânio natural ou empobrecido para munições anti-blindado, lastro de naves, azulejos esmaltados ou vidros coloridos.

Existem igualmente utilizações comerciais para os produtos do decaimento radioactivo do urânio e do tório. O ^{226}Ra utiliza-se na pintura de mostradores luminosos e em radioterapia no tratamento de tumores. O filho deste, o ^{222}Rn , que tem um período de semi-vida de 3.8 dias, é utilizado, após selagem em tubos minúsculos designados de sementes ou agulhas, para irradiação local em doentes.

9.2.1. Estados de oxidação

O Urânio pode existir, em ambientes aquosos, nos estados de oxidação +3, +4, +5 e +6.

O U (VI), ou seja o ião urânio, UO_2^{2+} , e o U (IV) são os mais comuns estados de oxidação do Urânio em ambientes naturais.

O Urânio existe no estado de oxidação +6 sob condições ambientais desde oxidantes até moderadamente redutoras. O U (IV) é estável sob condições redutoras e é considerado relativamente imóvel, uma vez que o U (IV) forma minerais pouco solúveis, como a uraninite, UO_2 .

O U (III) dissolvido oxida-se facilmente para U (IV) e a espécie aquosa de U (V), UO_2^+ , por se tratar de uma espécie transitória, rapidamente se transforma para U (IV) e U (VI).

A redução do urânio de U (VI) para U (IV) por processos quer bióticos, quer abióticos, tem recebido alguma atenção, porquanto o estado de oxidação do urânio tem considerável importância na sua mobilidade nos fluxos de resíduos e no ambiente. Estes processos encontram-se, de resto, na base de algumas tecnologias de remediação, bem como, aliás, a redução microbiana de U (VI), que sugere um mecanismo potencial para a remoção de urânio de águas e solos contaminados.

O U (VI) dissolvido tende a formar complexos com ligantes inorgânicos contendo oxigénio, tais como o hidroxilo, o carbonato e o fosfato. O UO_2^{2+} hidrolisa-se para formar uma série de complexos hidroxilo-aquosos, entre os quais se incluem o UO_2OH^+ , $(\text{UO}_2)_2(\text{OH})_2^{2+}$, $(\text{UO}_2)_3(\text{OH})_5^+$ e $\text{UO}_2(\text{OH})_3^-$. Em sistemas aquosos em equilíbrio com o ar ou maior pCO_2 e com valores de pH de neutros a elevados, dominam os carbonato-complexos $[\text{UO}_2\text{CO}_3^0(\text{aq})]$, $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$, $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ mas com valores de pH menores predominam as espécies hidrolisadas, à medida que a solubilidade do CO_2 decresce.

O diagrama de Eh-pH apresentado na Figura 9-5 representa as espécies aquosas predominantes calculadas para o urânio dissolvido a 25° C, com a concentração de urânio dissolvido total de 1×10^{-8} mol/l, a concentração de carbonato dissolvido total de 1×10^{-3} mol/l e a concentração de fluoreto dissolvido total de 5×10^{-6} mol/l.

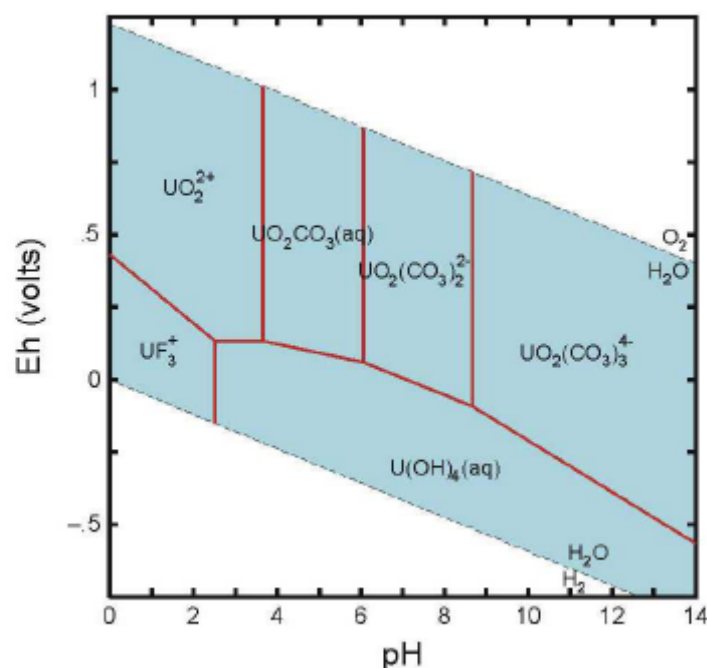


Figura 9-5 – Diagrama de Eh-pH exibindo as espécies aquosas predominantes de urânio (diagrama calculado a 25°C, com uma concentração total de urânio dissolvido de 1×10^{-8} mol/l). (Adaptado de Krupka et al., 2004).

A especiação aquosa do U (VI) em águas contendo carbonato, com pH variando de quase neutro a básico, é dominada por uma série de complexos carbonatados aniônicos aquosos (vejam-se os já acima indicados UO_2CO_3^0 (aq), $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ e $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$).

Uma vez que os aniões não são facilmente adsorvidos à superfície dos minerais em condições de pH básico, a formação de complexos carbonatados aniônicos de U (VI) com valores de pH superiores a 6, resulta numa solubilidade acrescida do U (VI), num decréscimo da adsorção do U (VI) e numa maior mobilidade por parte do urânio.

Complexos fosfato- UO_2 , tais como $\text{UO}_2\text{HPO}_4^0$ (aq) e UO_2PO_4^- podem assumir alguma importância em sistemas aquosos com pH entre 6 e 9, quando a taxa de concentração total ($\text{PO}_4^{3-} / \text{CO}_3^{2-}$) $\geq 10^{-1}$.

Complexos com SO_4^{2-} , F^- e eventualmente Cl^- , são espécies potencialmente importantes de U(VI) quando as concentrações destes aniões são elevadas, mas a sua estabilidade é consideravelmente menor do que a dos complexos de fosfato e carbonato.

Sob condições redutoras, a especiação do U (IV) é dominada pela espécie neutra $\text{U}(\text{OH})_4^0$ (aq) com valores de pH superiores a 2. A complexação do U (IV) com ácidos húmicos e fúlvicos naturais tem sido sugerida como um processo importante. Assim, o U (IV) formaria complexos orgânicos estáveis, aumentando a solubilidade do U (IV). Em geral, as espécies de U (IV) formam complexos orgânicos mais fortes do que as espécies de U (VI).

Se as condições de campo se tornarem suficientemente redutoras para que o U (IV) seja mantido dissolvido neste estado de oxidação, o U (IV) precipitará na forma de um mineral moderadamente solúvel, como a uraninite, UO_2 . Nestas condições, o urânio será considerado relativamente imóvel. A Figura 9-6 reproduz o diagrama de Eh-pH da figura 9-5, mostrando a região em que a uraninite se encontra em estado de sobressaturação (representada em cor creme) para uma concentração total de urânio dissolvido de 1×10^{-8} mol/l.

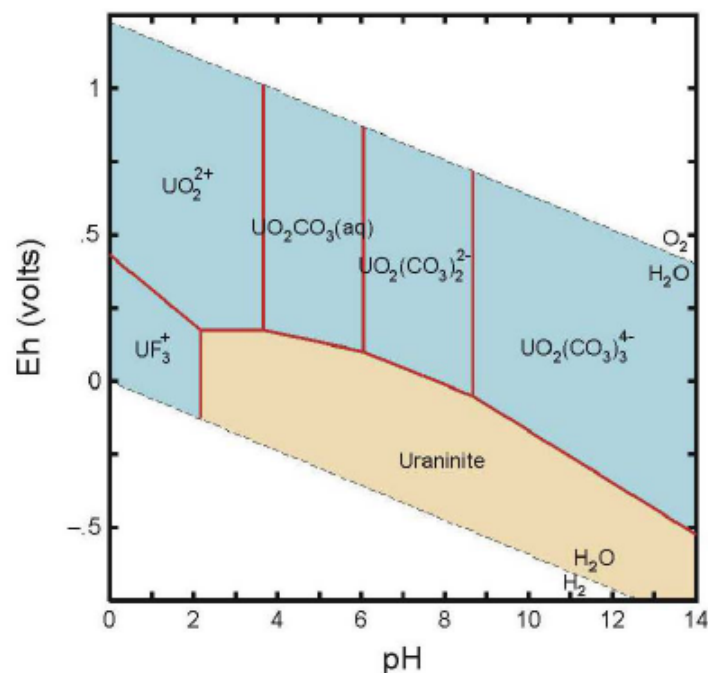


Figura 9-6 – Diagrama de Eh-pH exibindo a região (de cor creme) de sobressaturação da uraninite (UO_2) (diagrama calculado a 25°C, com uma concentração total de urânio dissolvido de 1×10^{-8} mol/l). (Adaptado de Krupka et al., 2004).

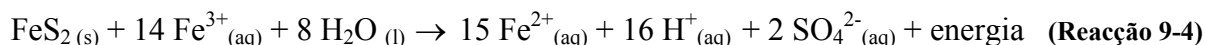
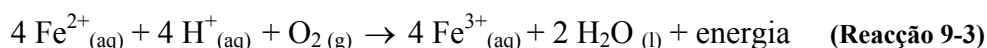
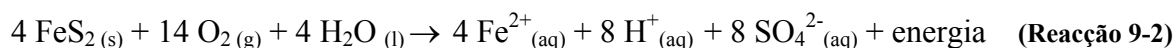
Em sistemas geológicos representados por estas condições de Eh-pH, a uraninite pode precipitar e limitar a concentração máxima de urânio dissolvido a 1×10^{-8} mol/l, ou menos, nestes sedimentos.

O U (IV) representa o estado de oxidação menos solúvel e menos móvel do urânio. Pelo contrário, o U (VI) representa a sua forma mais solúvel e mais móvel. Como consequência, se existir oxigénio disponível, tanto dissolvido, como na forma gasosa, o U^{4+} pode ser oxidado para U^{6+} e o urânio dissolver-se-á na água como ião uranil, UO_2^{2+} .

A dissolução oxidativa do urânio obtém-se através de uma sequência de reacções químicas, que se apresentam seguidamente de forma simplificada (Lottermoser, 2003):

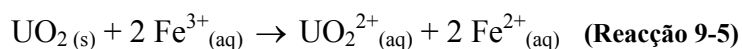


A oxidação dos minerais de U^{4+} [uraninite, UO_2 , coffinite, $U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$, brannerite, $(U,Ca,Y,Ce)(Ti,Fe)_2O_6$, pechblenda, UO_2] pode também obter-se por intermédio do oxidante Fe^{3+} . A produção de Fe^{3+} é possível através da oxidação indirecta de sulfuretos de ferro existentes nos resíduos:



Num primeiro passo (reacção 9-2) a pirite reage com oxigénio e água, para produzir Fe^{2+} dissolvido, sulfato e iões hidrogénio. A libertação do hidrogénio com o sulfato resulta numa solução ácida, a menos que ocorram outras reacções que neutralizem os iões hidrogénio.

Num segundo passo (reacção 9-3) o Fe^{2+} é oxidado para Fe^{3+} , o que acontece a baixo pH. Por sua vez, o Fe^{3+} oxida a pirite, através da reacção 9-4, a qual, por seu turno, produz mais Fe^{2+} , e assim por diante. As reacções 9-2 a 9-4 representam a oxidação indirecta da pirite. Contudo, o Fe^{3+} produzido na reacção 9-3 pode oxidar, não apenas minerais reduzidos como a pirite, mas também minerais de urânio reduzido (U^{4+}) como a uraninite (reacção 9-5):



A oxidação da uraninite (reacção 9-5) gera iões uranil dissolvidos e Fe^{2+} . Este Fe^{2+} pode ser oxidado para Fe^{3+} , através da reacção 9-3, o qual, por seu lado, oxida a uraninite via reacção 9-5, a qual produz mais Fe^{2+} , e assim por diante. O ciclo continua até que acabe o fornecimento de uraninite ou Fe^{3+} ao sistema. Embora não seja necessário oxigénio para que a reacção 9-5 tenha lugar, ele é no entanto necessário para converter o Fe^{2+} para Fe^{3+} (reacção 9-3). Desta forma, a oxidação da pirite produz ácido e Fe^{3+} , e estes dois produtos aumentam a lixiviação e destruição dos minerais de urânio. As baixas condições de pH resultantes, favorecem a dissolução de urânio, metais e metalóides no interior dos resíduos sólidos produzidos pela actividade mineira.

Desde que os minerais de U^{4+} , uraninite, coffinite, brannerite e pechblenda, sejam expostos às acções do oxigénio atmosférico e da água, rapidamente tem lugar a sua oxidação e dissolução. Outros minerais reduzidos, como os sulfuretos contidos nos resíduos, irão ser igualmente oxidados. Se os resíduos ficarem empobrecidos em minerais susceptíveis de neutralizar os

ácidos, os poros serão preenchidos por águas ácidas e desenvolver-se-á um processo de lixiviação ácida. As condições de Drenagem Ácida de Mina favorecem uma maior dissolução de minerais de urânio e o transporte do urânio dissolvido como complexos sulfatados. Consequentemente, a libertação de urânio, metais e metalóides a partir dos resíduos sólidos da mina é controlada pela disponibilidade de oxigénio e água.

A dissolução oxidativa do urânio parece ser bastante similar à dos sulfuretos. Assim:

- certas bactérias actuam como catalisadoras na destruição dos sulfuretos e dos minerais de urânio;
- a destruição dos minerais de ambos os tipos pode ocorrer através de processos bióticos ou abióticos, ou de processos de oxidação directa ou indirecta;
- a destruição dos minerais é obtida progressivamente, por intermédio de uma sequência de reacções químicas;
- vários factores, como sejam o pH da solução, a abundância de oxigénio, a actividade microbiológica e a área das superfícies dos minerais, influem a taxa de dissolução mineral.

9.2.2. Sorpção

O U (VI) é adsorvido por uma grande variedade de minerais e fases relacionadas, onde se incluem argilas, óxidos, silicatos e material orgânico natural.

Os parâmetros relevantes que afectam a adsorção do urânio são as condições de oxidação-redução, o pH e concentrações dos ligantes complexantes, como o carbonato dissolvido, a força iónica e a mineralogia.

Tal como se passa com a adsorção da maioria dos metais, o pH tem um efeito significativo na adsorção de U (VI) porque o pH influencia fortemente a especiação aquosa do U (VI) e o número de locais de troca iónica em superfícies de sólidos com carga variável, tais como óxidos de ferro, alumínio e matéria orgânica natural.

A sorpção de urânio em óxidos de ferro e argilas esmectíticas demonstrou-se extensiva na ausência de CO_3^{2-} . Na presença de CO_3^{2-} e de complexantes orgânicos, demonstrou-se ser a sorpção do U (VI) substancialmente reduzida ou bastante inibida.

A adsorção do U (VI) por solos e fases minerais simples em soluções aquosas contendo carbonato, é menor com valores de pH inferiores a 3, aumenta rapidamente com valores de pH situados entre 3 e 5, atinge um máximo de adsorção no intervalo de 5 a 7 / 8 e então decresce com o aumento do pH para valores superiores a 7 / 8, dependendo do adsorvente.

Em soluções de baixa força iónica, as concentrações do ião uranil poderão ser afectadas por processos de adsorção em troca catiónica. O U (VI) é adsorvido por argilas, matéria orgânica e óxidos, e isto limita a sua mobilidade. À medida que a força iónica de uma solução oxidada aumenta, outros iões, nomeadamente o Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+} deslocam o ião uranil, reenviando-o para a solução. Desta forma, para além de outros catiões competirem com o U (VI) por locais de troca iónica, também os iões carbonato formam complexos solúveis com o ião uranil, reduzindo ainda mais a sua afinidade por sólidos carregados positivamente, enquanto aumentam a quantidade total de urânio na solução.

A matéria orgânica de fase sólida é outro destino possível para o ião urânio em solos e também em sedimentos. Os mecanismos para o aprisionamento do urânio em sedimentos ricos de matéria orgânica são vários e complexos. Um mecanismo pode envolver sorção do catião urânio em locais de troca iónica, tais como grupos ácidos carboxílicos (COOH). Estes grupos podem coordenar com o ião urânio, deslocando água de hidratação e formar complexos estáveis.

9.2.2.1. Coeficientes de distribuição, K_d , para o U (VI)

O coeficiente de distribuição (ou de partição, no caso das substâncias hidrofóbicas), K_d , descreve a sorção, ou retardação, de um contaminante, relacionando o seu particionamento entre a fase sólida e a fase líquida (Equação 9-1):

$$K_d = \frac{C_{\text{sólido}}}{C_{\text{líquido}}} \quad (\text{Eq. 9-1})$$

onde

K_d é o coeficiente de distribuição, em $[L^3 \cdot M^{-1}]$;

$C_{\text{sólido}}$ é a concentração do contaminante na fase sólida, em $[M \cdot M^{-1}]$;

$C_{\text{líquido}}$ é a concentração do contaminante na fase líquida, em $[M \cdot L^3]$;

O valor de K_d é normalmente utilizado com vista à definição do factor de retardação, R_f , que corresponde à razão entre a velocidade linear média da água e a velocidade linear média do contaminante (Equação 9-2):

$$R_f = \frac{v_p}{v_c} \quad (\text{Eq. 9-2})$$

sendo R_f adimensional, v_p a velocidade da água $[L \cdot T^{-1}]$ e v_c a velocidade do contaminante $[L \cdot T^{-1}]$;

Sendo conhecidos os valores de K_d e os valores da densidade e porosidade do meio, é possível definir R_f , para um fluxo em meio poroso saturado, como (Equação 9-3):

$$R_f = 1 + \left(\frac{\rho_b}{n_e} \right) K_d \quad (\text{Eq. 9-3})$$

com

ρ_b - densidade do meio, em $[M \cdot L^{-3}]$;

n_e - porosidade efectiva do meio saturado, adimensional;

O parâmetro K_d é válido apenas para um adsorvente particular e aplica-se apenas às condições químicas em que foi medido. Apesar das limitações que encerra, é normal que sejam usualmente utilizados valores de K_d retirados da literatura, com vista à realização de cálculos preliminares.

Não deve, contudo, esquecer-se que esta é uma matéria delicada, uma vez que envolve a assumpção de diversas premissas:

- existem apenas quantidades traço de contaminantes nas fases sólida e líquida;
- a relação entre as quantidades de contaminante existentes nas fases sólida e líquida é linear;
- as condições existentes são condições de equilíbrio;
- as cinéticas de adsorção e desadsorção são idênticas;
- descreve a distribuição (ou particionamento) entre um sorbato (contaminante) e um sorvente (solo);
- todos os locais são acessíveis e têm igual influência, isto é, qualquer local pode adsorver determinada espécie de contaminante;

Este último ponto é especialmente restritivo para utilização em modelação de água subterrânea, pois requer que os valores de K_d sejam usados apenas para a previsão do transporte em sistemas quimicamente idênticos aos utilizados em laboratório. A variação química no solo ou na água de um sistema, pode resultar em grandes diferenças nos valores de K_d .

Os radionuclídeos que são fortemente adsorvidos pelos sedimentos possuem grandes valores de K_d (tipicamente superiores a 100 ml/g) quando comparados com os radionuclídeos que não são significativamente retardados por adsorção.

Os radionuclídeos que não são adsorvidos pelos sedimentos e migram essencialmente à mesma velocidade que a água, possuem valores de K_d próximos de 0 ml/g.

Thibault *et al.* (1990) actualizaram uma compilação de valores de K_d relativos a solos. Os valores de K_d para cada elemento foram organizados de acordo com 4 tipos de solos, os quais incluem areia (com conteúdo ≥ 70 % de partículas de dimensões da areia), argila (com conteúdo ≥ 35 % de partículas de dimensões da argila), lodo (contendo uma distribuição equilibrada de areia, argila e silte, ou ≤ 80 % de partículas de dimensão do silte) e orgânico (com conteúdo > 30 % de matéria orgânica). Baseados nas suas avaliações prévias, Thibault *et al.* procederam à transformação logarítmica e calcularam as médias dos valores de K_d no sentido de obterem uma média geométrica simples para cada tipo de solo. Os valores de K_d para cada tipo de solo e o intervalo de valores a eles associados, para o urânio, são apresentados na Tabela 9-3.

Tipo de solo	Média geométrica dos valores de K_d (ml/g)	Intervalo de valores observados de K_d (ml/g)	Número de valores de K_d (ml/g)
Areia	35	0.03 - 2200	24
Lodo	15	0.2 - 4500	8
Argila	1600	46 - 395100	7
Orgânico	410	33 - 7350	6

Tabela 9-3 – Média geométrica dos valores de K_d para solos do tipo areia, argila, lodo e orgânico (adaptado de Thibault et al., 1990).

9.3. Aspectos gerais da indústria de mineração do urânio

Na indústria mineira, a parte valiosa do minério bruto corresponde normalmente a uma quantidade muito pequena do volume total de material que deve ser trabalhado para a obter.

No caso do urânio, são manuseadas mais de 6900 unidades de material para conseguir produzir apenas 1 unidade comercializável. Esta elevada relação de material manuseado / material comercializável deve-se não apenas aos baixos teores de metal no minério - a percentagem típica de urânio numa formação mineralizada é cerca de 0.15 % (*Minerals Yearbook, 1983*) – mas também aos métodos e processos utilizados na mineração.

Nestes últimos distinguem-se várias etapas - desde logo, os materiais sobrejacentes devem ser removidos, a fim de permitir o acesso ao minério. O minério é então extraído e transportado para a moagem onde é concentrado e beneficiado.

Os processos referidos dão, assim, origem a quatro espécies de resíduos: resíduos da mina, rejeitados, resíduos de lixiviação e água de mina.

Após a mineração, o primeiro passo é geralmente a moagem e trituração. Os minérios triturados são concentrados para libertar da ganga as partículas de metal e os minerais com interesse económico. Estes processos incluem técnicas de separação gravítica, magnética ou electrostática, flotação, troca iónica, extracção com solvente, electrólise, precipitação e amalgamação. A escolha do processo depende das propriedades do metal ou do minério e da ganga, das propriedades de outros metais ou minerais no mesmo minério e dos custos envolvidos ou da viabilidade de aplicação de métodos alternativos.

Todos estes processos geram rejeitados, ou seja, outro tipo de resíduos. Os rejeitados normalmente são depositados como lamas e consistem em cerca de 50% a 70% de efluente líquido e em 30% a 50% de sólidos (argilas, siltes e areias). Mais de metade de todos os rejeitados são dispostos em lagoas de decantação.

Os processos de lixiviação de resíduos, lixiviação em pilha ou lixiviação “*in situ*” são igualmente usados para extrair metais a partir de minério de baixo teor.

No processo de lixiviação de resíduos, os resíduos são colocados directamente no solo. Em seguida aplica-se ácido, normalmente por pulverização. À medida que o líquido percola através dos resíduos, o mesmo vai lixiviando os metais, o que pode demorar anos a completar-se. O lixiviado, rico com os metais pretendidos, é recolhido na base da pilha e submetido a tratamento posterior, a fim de recuperar os metais. Este tipo de processo ocupa normalmente muito espaço, tanto em superfície, como em profundidade.

Os processos de lixiviação em pilha ocupam muito menos espaço do que os descritos anteriormente. Utilizam uma capa impermeável sob a pilha a lixiviar, a fim de maximizar a recolha de lixiviado. Por outro lado, normalmente demoram meses, em vez de anos, a completar-se. São geralmente utilizados em minérios de maior grau de mineralização. Quando a lixiviação deixa de ser economicamente rentável, o minério lixiviado é deixado no local, ou próximo, sem tratamento adicional.

A lixiviação “*in situ*” emprega-se em corpos mineralizados fracturados, à superfície ou em antigas instalações subterrâneas. A solução lixiviante é aplicada por intermédio de tubagens ou por percolação através do material sobrejacente. A solução lixiviante é então bombeada dos colectores de recolha para os dispositivos de recuperação do metal.

Água de mina é água que se infiltra numa mina e deve ser retirada, com vista a facilitar os trabalhos mineiros. Tanto a quantidade como a qualidade desta água variam de local para

local, havendo, por vezes, necessidade de dispor a água de mina em diversas lagoas concebidas para o efeito.

Os resíduos mineiros podem utilizar-se no local ou fora dele, podem dispor-se em pilhas, ou usar-se em operações de lixiviação, com vista à recuperação adicional de material com interesse económico - isto é, se o preço do produto exceder os custos de extracção.

Da mesma forma, os rejeitados podem utilizar-se no local ou fora dele, podem dispor-se em barragens de rejeitados, ou usar-se em operações de lixiviação, com vista à recuperação de material com interesse económico que continua presente após os processos de moagem se terem completado.

Os rejeitados podem também conter resíduos dos reagentes utilizados nos processos de flotação.

A água de mina pode, por vezes após tratamento, ser descarregada para cursos de água superficiais (rios ou ribeiros), ser usada no processo de moagem ou ser localmente aproveitada, com vista ao controlo do pó, como fluido de perfuração ou como veículo de reenvio para a mina de material sólido pulverizado (na forma de lamas) que funcionará como enchimento.

Alguns métodos de eliminação de rejeitados incluem:

- barragens ou lagoas de rejeitados, que impedem a libertação de substâncias dissolvidas e suspensas, protegendo a qualidade das águas superficiais. As barragens de rejeitados são responsáveis pela eliminação de mais de 50% do total de rejeitados produzidos;
- enchimento de céus abertos;
- eliminação abaixo do nível topográfico ("*below-grade disposal*") que consiste na colocação dos rejeitados num poço escavado, por forma a que no encerramento todo o depósito se encontre abaixo da superfície original do terreno;
- eliminação no mar (também designada por eliminação "*offshore*");

Quanto à eliminação dos resíduos mineiros, a maioria destes são empilhados próximo da mina. Os materiais sobrejacentes ao minério, são usualmente eliminados nos declives exteriores da escavação, embora a tendência actual aponte na direcção do seu enchimento imediato.

Os materiais submetidos a lixiviação permanecem no local após o completamento do processo. A prática corrente é proceder ao transporte dos materiais a lixiviar para locais específicos, onde aqueles são espalhados e escarificados, com vista a facilitar a infiltração da solução lixiviante. O processo pode demorar dezenas de anos a completar-se.

Alguns métodos de eliminação de água de mina incluem, para além dos aproveitamentos já acima indicados, os seguintes:

- tratamento da água de mina em represamentos efectuados no local, quando a sua descarga ou reciclagem não são viáveis. Os tratamentos incluem processos de sedimentação, precipitação, adição de coagulantes ou floculantes, ou a remoção de certas espécies de elementos ou iões (é o caso, por exemplo, da remoção de ^{226}Ra através da co-precipitação com BaCl em lagoas de decantação na indústria do urânio).

9.3.1. Mineração e extracção do urânio

Tradicionalmente o urânio é extraído a céu aberto ou a partir de minas subterrâneas, e o minério é tratado em instalações hidrometalúrgicas situadas no local de extracção ou nas suas imediações. Para além destas formas de extracção, ditas de convencionais, utilizam-se também as lixiviações, tanto “*in situ*”, como estática, processos que se aplicam nalguns casos.

Na mineração e extracção convencionais, os minérios obtêm-se a partir da exploração subterrânea ou a céu aberto. O minério é inicialmente triturado e reduzido a pequenos fragmentos da dimensão de areia, com vista à extracção do urânio, e depois lixiviado. Os processos químicos utilizam solventes ácidos (ácido sulfúrico ou nítrico) ou alcalinos (carbonato-bicarbonato de sódio) bem como oxidantes (clorato de sódio, NaClO_3 , ião férrico, Fe^{3+} , peróxido de hidrogénio, H_2O_2). São essenciais condições oxidantes para permitir a formação dos complexos altamente solúveis de U^{6+} .

A lixiviação ácida ou alcalina é aplicada a pilhas de material em campo ou, o que é mais comum, é efectuada sob condições controladas em instalações hidrometalúrgicas.

Os processos de extracção de urânio ácidos ou alcalinos, oxidam o urânio (U^{4+}) presente nos minerais, por exemplo na uraninite, e dissolve o urânio oxidado (U^{6+}) como complexo sulfatado ou carbonatado (reacções 9-6 e 9-7):



Os processos químicos dissolvem os minerais de urânio e forma-se um licor enriquecido em urânio. Para além do urânio, o licor contém uma quantidade de outros elementos, tais como elementos das terras raras, que se encontravam presentes como catiões de substituição nos minerais de urânio.

Após a remoção dos sólidos por filtração, ou por outros métodos, a solução é concentrada e purificada, por meio de processos de troca iónica ou técnicas de extracção por solventes.

Através da adição de amónio aos licores, o urânio precipita sob a forma de diuranato de amónio, que apresenta uma cor amarela e é conhecido como “*yellowcake*” (U_3O_8). O urânio contido no “*yellowcake*” é maioritariamente ^{238}U (>99 %) contendo uma pequena proporção de ^{235}U e quantidades traço de outros elementos, como rádio e tório.

9.3.2. Enriquecimento de urânio

Com vista ao seu enriquecimento, o U_3O_8 é quimicamente convertido em UF_6 . O processo de enriquecimento aumenta a percentagem do isótopo de urânio fissionável, ^{235}U , bem como a de ^{234}U .

Existem vários processos utilizados no enriquecimento de urânio. Nos Estados Unidos utiliza-se o mecanismo de difusão gasosa. Este mecanismo de enriquecimento baseia-se no facto de uma molécula de UF_6 contendo ^{235}U ou ^{234}U , ser mais leve e mais pequena, e ter, por isso, uma ligeiramente mais elevada velocidade termal, do que uma molécula de UF_6 que contenha ^{238}U . À medida que o UF_6 passa por um conjunto de estágios difusivos, as moléculas de $^{234}\text{UF}_6$ e $^{235}\text{UF}_6$ vão-se gradualmente concentrando a jusante e ficando menos concentradas a montante, onde, pelo contrário, se concentram as moléculas de $^{238}\text{UF}_6$.

As moléculas de UF_6 acumuladas a jusante são então recolhidas e tratadas, com vista a obter o enriquecimento desejado.

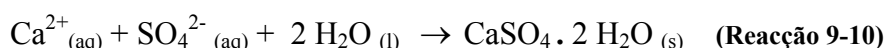
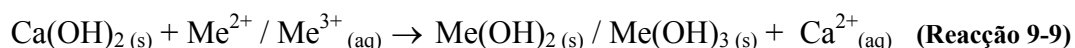
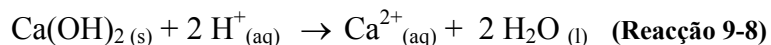
As moléculas de UF₆ acumuladas a montante possuem um conteúdo diminuído de ²³⁵UF₆, pelo que o urânio nelas contido é também conhecido como urânio empobrecido. Outros processos utilizados no enriquecimento de urânio são a separação centrífuga gasosa, a separação laser e a separação termal, embora este último tenha sido abandonado, por ser pouco eficiente.

9.3.3. Tratamento da água de mina

A acidez das águas provenientes das minas de urânio pode dever-se ao desenvolvimento de Drenagem Ácida de Mina ou à utilização de ácido sulfúrico durante a extracção de urânio.

As águas ácidas e ricas em metais podem ser tratadas utilizando as técnicas de tratamento usadas nas situações em que se verifica Drenagem Ácida de Mina. Podem utilizar-se diversos agentes de neutralização, mas um dos mais empregues, devido à facilidade de manejo, segurança e aos relativamente baixos custos, é a cal hidratada, Ca(OH)₂.

Neste processo, os ácidos são neutralizados, os metais (Me) precipitam na forma de hidróxidos metálicos e forma-se gesso, se existir sulfato suficiente em solução (reacções 9-8 a 9-10):

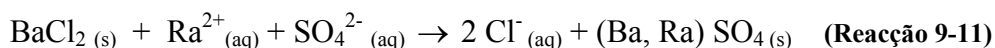


A neutralização por intermédio de cal é eficiente para a remoção de metais – tais como o cádmio, cobre, ferro, chumbo, níquel e zinco – da solução. Não obstante, a solubilidade dos metais varia com o pH, e a concentração mais baixa dos diversos metais dissolvidos não se obtém com o mesmo pH. Nem todos os metais precipitam com o mesmo pH, podendo ser necessária uma combinação de agentes neutralizantes ou outros aditivos, a fim de que se obtenha uma aceitável qualidade da água.

O tratamento químico de águas ácidas ricas em urânio, com carbonato e/ou cal reduz o urânio dissolvido e as concentrações de metais pesados e neutraliza a acidez da solução. Os metais dissolvidos e os radionuclídeos precipitam como lamas, devendo as lamas ser dispostas como resíduos, usualmente num depósito de rejeitados.

Por outro lado, o tratamento químico das águas ácidas ricas em urânio com carbonato, pode promover uma desorção indesejada, com mobilização e lixiviação do urânio a partir dos resíduos mineiros. A dissolução de carbonato sólido gera iões bicarbonato, e os iões uranil ficam disponíveis para se complexar com os ligantes bicarbonato. Desta forma, uma adição excessiva de carbonato aos resíduos das minas de urânio e solos contaminados, pode aumentar a mobilidade do urânio e amplificar os problemas de contaminação pré-existentes.

A remoção de rádio da água é acompanhada pela precipitação com cloreto de bário. O cloreto de bário é introduzido no circuito aquoso, e o rádio co-precipita com sulfato de bário, de acordo com o ilustrado na reacção 9-11:



Algum cálcio que se encontre presente, precipitará como cristais de sulfato de cálcio. Segue-se a sedimentação e precipitação dos sais precipitados em lagoas de rejeitados. A evaporação das águas residuais conduz à precipitação de sais e sedimentos. Os sais radioactivos e os sedimentos das lagoas de evaporação não podem ser deixados no seu interior, uma vez que podem redissolver, pelo que devem ser dispostos como rejeitados em local apropriado.

A água subterrânea contaminada pode ser tratada através de métodos *ex-situ* (bombagem e tratamento) ou *in situ* (barreiras activas permeáveis, bioremediação).

Deste último conjunto de técnicas, merece referência a capacidade que certos organismos possuem de, directa ou indirectamente, reduzir o U^{6+} móvel, à espécie imóvel U^{4+} , a qual precipita como uraninite insolúvel.

Esta propriedade dos microorganismos – a capacidade de reduzir o U^{6+} a U^{4+} , é utilizada na remediação de águas subterrâneas contaminadas.

A redução directa é efectuada por determinados microorganismos, enquanto que a redução indirecta se obtém a partir da produção biológica de sulfureto de hidrogénio. Tanto uma como a outra resultam na precipitação de U^{6+} dissolvido como óxido de U^{4+} insolúvel.

9.4. Toxicologia do Urânio

Os componentes de um ecossistema podem ser divididos em vários compartimentos maiores. A Figura 9-7 mostra os diversos percursos de transporte entre o urânio disponível e os compartimentos ambientais em que se encontra, bem como os mecanismos que conduzem à sua absorção por parte da população.

A deposição inicial de urânio num compartimento, assim como as trocas entre compartimentos (que reflectem a sua mobilidade) dependem de vários factores, tais como as formas física e química do urânio, o meio ambiente, o material orgânico presente, o potencial de oxirredução, a natureza dos materiais de sorção e o tamanho e composição das partículas sorventes.

Embora os processos naturais redistribuam muito mais urânio no ambiente do que as indústrias integrantes do ciclo nuclear, é um facto que estas indústrias podem libertar grandes quantidades de urânio em localizações específicas, especialmente na forma de sólidos colocados em pilhas de rejeitados, seguidos por líquidos libertados nas barragens/lagoas de rejeitados e também emissões atmosféricas, tanto através das fábricas, como por efeito da erosão das pilhas de rejeitados.

São as emissões atmosféricas (produzidas directamente ou por erosão das pilhas de rejeitados) e as descargas líquidas (escoamento das barragens de rejeitados e erosão pela água das pilhas de rejeitados) as situações que representam as vias mais importantes de exposição pública (inalação e ingestão) no caso dos percursos se completarem.

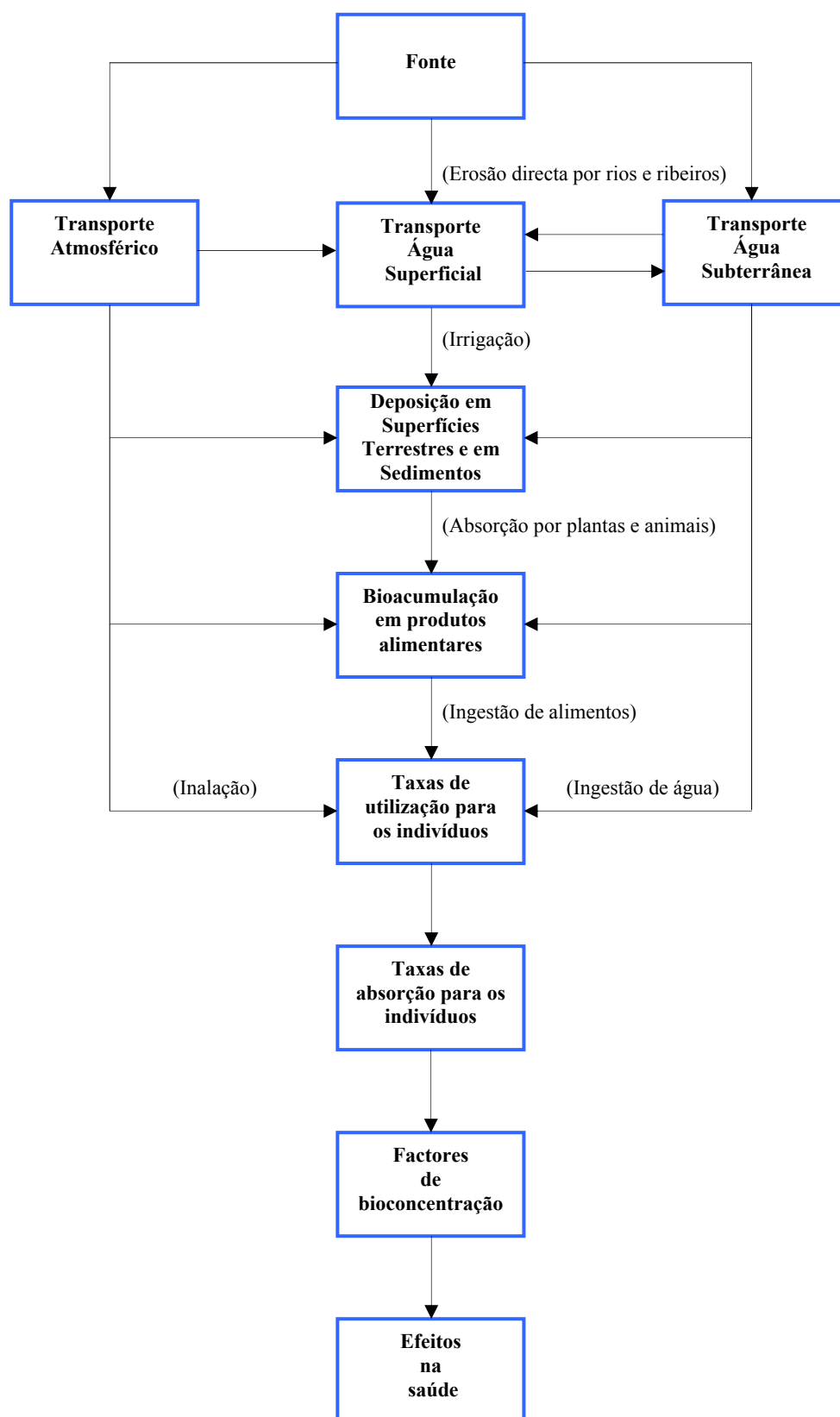


Figura 9-7 – Vias ambientais possíveis para que o urânio produza efeitos potenciais na saúde humana.
(adaptado de U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, ATSDR, 1999).

Quando transportadas no ar, as partículas de urânio representam uma fonte de inalação para os seres humanos, numa extensão que depende da sua concentração e tamanho. Para as partículas de urânio constituírem um risco de inalação para os seres humanos, o seu tamanho deve

situar-se no intervalo entre 1 e 10 μm . Nalguns casos, os rejeitados sólidos foram removidos do local para utilização como enchimento ou material de construção, o que pode levar à exposição a radiações externas.

A deposição de urânio atmosférico pode ocorrer por deposição seca ou húmida. A deposição seca resulta da sedimentação por efeito da gravidade e do impacto em superfícies expostas a fluxo atmosférico turbulento. A taxa de deposição depende do tamanho e densidade das partículas, da forma química e do grau de turbulência do ar.

Na deposição húmida de contaminantes atmosféricos, o urânio é lavado da atmosfera pela chuva, granizo, neve ou outras formas de humidade. A taxa de deposição depende do tamanho das partículas e da forma química, que condiciona a solubilidade.

O urânio assim depositado (por via seca ou húmida) encontrar-se-á no solo ou em águas superficiais. Se a deposição for no solo, o urânio pode ser incorporado por este ou aderir às superfícies das plantas, voltar a ser suspenso em razão da acção do vento, ou ser lavado do solo e passar para a água superficial e subterrânea.

Para além da migração do urânio dissolvido ou suspenso na água, o transporte e dispersão de urânio na água superficial ou subterrânea, é afectado pela adsorção e desadsorção do urânio nos sedimentos da água superficial. Em muitas águas, os sedimentos actuam como sorvedouros para o urânio e as suas concentrações nos sedimentos e nos sólidos suspensos, são várias ordens de grandeza superiores às da água envolvente.

O urânio pode ser transportado para a vegetação através do ar ou da água. Pode ser depositado nas plantas por deposição directa ou ressuspensão, ou pode aderir à membrana exterior do sistema de raízes da planta com absorção potencial limitada. Da mesma forma, o urânio depositado nas plantas aquáticas ou na água, pode ser adsorvido ou mobilizado a partir da água.

As plantas, aquáticas ou terrestres, podem ser directamente consumidas por seres humanos, ou por animais aquáticos ou terrestres, os quais fornecem alimento aos seres humanos. A absorção ou bioconcentração de urânio por parte das plantas e animais, é o mecanismo através do qual o urânio, no solo, no ar e na água entra na cadeia alimentar dos seres humanos.

Vários factores influenciam a bioconcentração de urânio, tais como a forma física ou a forma química do urânio, a estação do ano e outros factores climáticos, como a temperatura, a idade do organismo, o tecido ou os órgãos envolvidos, e as características específicas do ecossistema local, como a quantidade total de sólidos dissolvidos e suspensos.

9.4.1. Efeitos na saúde

Vamos seguidamente introduzir dois conceitos, abaixo apresentados, importantes na percepção e estudo dos mecanismos de incorporação de urânio por parte dos seres vivos.

A Farmacocinética dedica-se ao estudo dos resultados da acção que o corpo exerce sobre as drogas.

A Farmacodinâmica dedica-se ao estudo dos resultados da acção que as drogas exercem sobre o corpo.

Os modelos Farmacocinéticos Fisiologicamente Baseados utilizam descrições matemáticas da absorção e distribuição de substâncias químicas, no sentido de descrever quantitativamente as

relações entre processos biológicos críticos (U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, ATSDR, 1999).

Os modelos Farmacocinéticos Fisiologicamente Baseados são utilizados em avaliações de risco, a fim de prever a concentração de fracções potencialmente tóxicas de determinadas substâncias químicas que podem ser adquiridas por determinado tecido vivo, na sequência de diversas combinações de via de absorção, nível da dose e espécie testada.

Apresenta-se na Figura 9-8 uma representação conceptual de um modelo Farmacocinético Fisiologicamente Baseado aplicado a uma substância química hipotética.

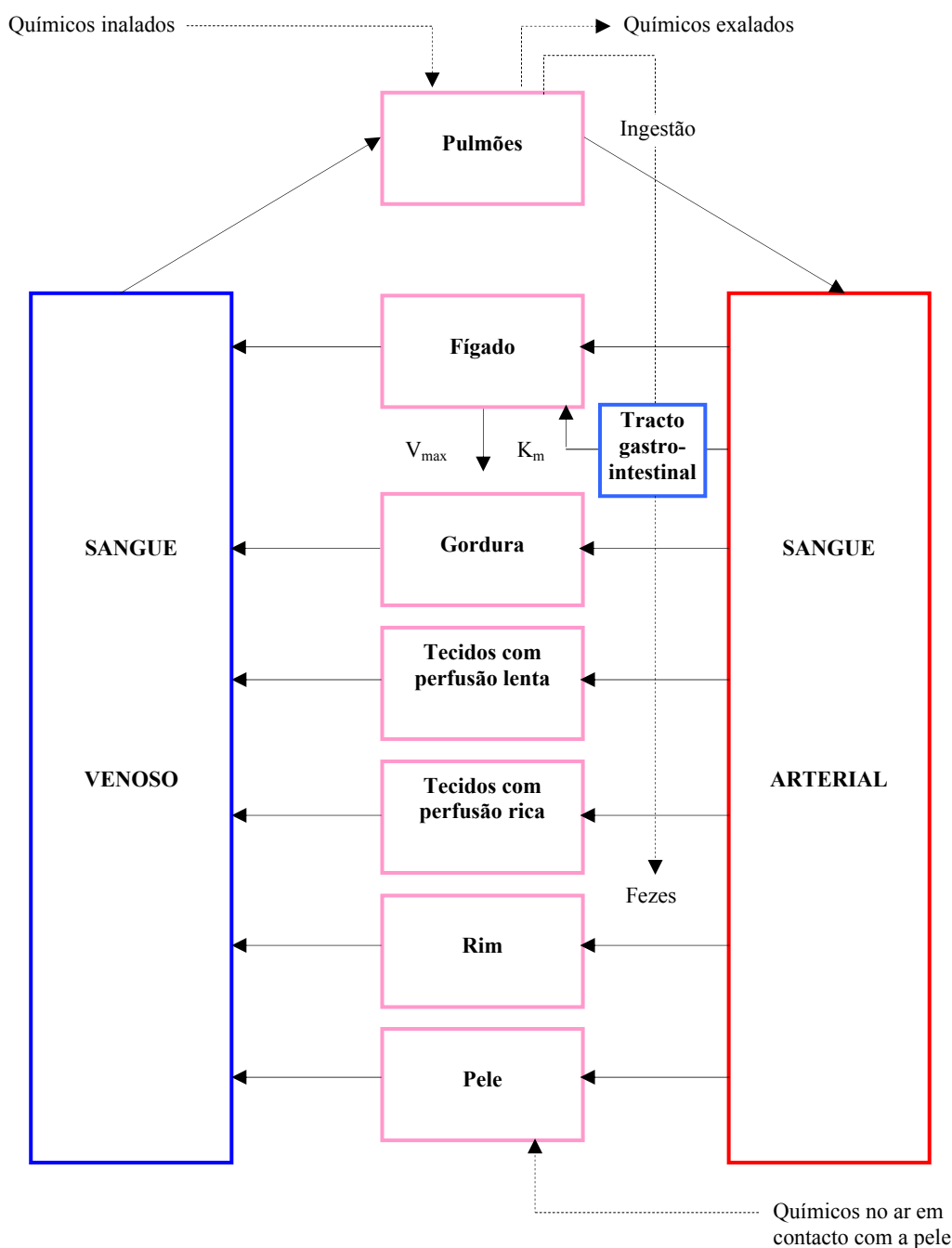


Figura 9-8 – Representação conceptual de um modelo Farmacocinético Fisiologicamente Baseado.
(adaptado de U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, ATSDR, 1999).

A presente representação conceptual aplica-se a uma substância química hipotética, a qual é absorvida através da pele, por inalação ou por ingestão, metabolizada no fígado e excretada na urina ou por exalação.

Os modelos Farmacocinéticos Fisiologicamente Baseados melhoram a extrapolação farmacocinética dos processos de avaliação de risco, pretendendo identificar níveis máximos de segurança para exposição humana a substâncias químicas. Para além disso, proporcionam meios científicos que permitem prever, para tecidos-alvo, a dose de substâncias químicas nos seres humanos expostos a níveis ambientais de risco, baseados nos resultados de estudos onde as doses foram maiores ou foram administradas em espécies diferentes.

A informação que seguidamente apresentamos organiza-se de acordo com as vias de exposição utilizadas pelo urânio para a sua incorporação no corpo humano – inalação, oral ou dermal –, com os efeitos sanitários causados – morte, sistémicos, imunológicos, neurológicos, reprodutivos, de desenvolvimento, genotóxicos e cancerígenos – e com os efeitos químicos e radiológicos provocados.

A absorção de urânio é pequena, pelas vias de exposição assinaladas (inalação, oral ou dermal).

A absorção de compostos de urânio inalado tem lugar no tracto respiratório por meio de transferência através das membranas celulares. A deposição, por inalação, de poeiras de urânio nos pulmões, depende do tamanho das partículas e a sua absorção depende da sua solubilidade nos fluidos biológicos.

A absorção dermal não foi quantificada, mas experiências de toxicidade em animais indicam que compostos de urânio solúveis em água são os mais facilmente absorvidos. Uma vez no sangue, o urânio é distribuído pelos órgãos do corpo. Nos fluidos corporais, o urânio existe geralmente como ião uranil, $(\text{UO}_2)^{2+}$, complexado com aniões como o citrato $(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)^{3-}$ e o bicarbonato $(\text{HCO}_3)^-$. Aproximadamente 67 % do urânio no sangue é filtrado nos rins e deixa o corpo através da urina dentro de 24 horas; o restante é distribuído pelos tecidos. O urânio distribui-se preferencialmente pelos ossos, fígado e rins. A grande maioria de urânio (>95%) que entra no corpo não é absorvido e é eliminado pelo corpo através das fezes.

Os efeitos na saúde associados com a exposição oral ou dermal ao urânio natural ou empobrecido (o urânio empobrecido é composto essencialmente pelo isótopo ^{238}U , ao passo que o urânio enriquecido é mais radioactivo, porque tem uma maior percentagem de ^{235}U do que o urânio natural) parecem ser apenas químicos e não radiológicos, enquanto que os efeitos da exposição por inalação podem incluir uma ligeira componente radiológica, em especial se a exposição for prolongada. De acordo com a Comissão para os Efeitos Biológicos da Radiação Ionizante, a comida ou a água ingeridas, contendo concentrações normais de urânio, muito provavelmente não serão carcinogénicas ou causarão outros problemas de saúde na maioria das pessoas. O urânio inalado encontra-se associado com baixo risco de cancro, sendo o maior risco a co-inalação de outras substâncias tóxicas ou carcinogénicas, tais como o gás radão ou fumo de tabaco.

Doses orais muito elevadas de urânio produzem efeitos renais nocivos nas pessoas. Estudos em animais de diversas espécies, comprovam o carácter de nefrotoxina do urânio e que os órgãos mais sensíveis são os rins. Efeitos hepáticos e no desenvolvimento foram também reportados nalguns estudos animais.

Estes aspectos direccionam-se especialmente para os efeitos da exposição ao urânio natural e empobrecido, apenas incluindo pequenos tópicos relativamente ao urânio enriquecido, o qual é considerado mais como um risco radiológico do que como um risco químico.

A toxicidade do urânio varia de acordo com a sua forma química e com a via de exposição. Geralmente, o urânio hexavalente, que tende a formar compostos solúveis, assume-se mais como provável tóxico sistémico do que o urânio tetravalente, que forma compostos insolúveis.

O urânio ingerido é menos tóxico do que o urânio inalado, o que pode, pelo menos em parte, atribuir-se à relativamente pequena absorção gastrointestinal dos compostos de urânio. Os dados disponíveis de uma variedade de compostos de urânio permitem concluir que o urânio possui um baixo grau de metalotoxicidade (toxicidade química) nos seres humanos.

Devido ao urânio natural produzir um baixo nível de radioactividade por massa de urânio, os efeitos renais e respiratórios decorrentes da exposição dos seres humanos e animais ao urânio, são usualmente atribuídos às suas propriedades químicas. No entanto, em exposições a isótopos de urânio mais radioactivos (os isótopos naturais ^{234}U e ^{235}U) foi sugerido que os efeitos produzidos pela toxicidade química e radiológica podem ser aditivos, ou podem potenciar-se nalgumas situações, ficando assim mascaradas as origens dos efeitos produzidos.

Têm sido associadas doenças respiratórias com a exposição à atmosfera das minas de urânio. Em vários estudos efectuados em mineiros concluiu-se que, embora a mineração de urânio eleve de forma clara o risco de contrair doenças respiratórias, a contribuição do urânio para este risco é muito pequena, ou mesmo nula.

O radão e os produtos do seu decaimento no ar interior, são os produtos que mais contribuem para a exposição do público à radiação ionizante e podem ser responsáveis por entre 10 % a 20 % de casos de cancro no pulmão. Os efeitos aditivos, pelo menos parcialmente, do tabaco foram observados em diversos estudos recentes.

A Tabela 9-4 lista os limites ocupacionais para o urânio, tório e alguns produtos críticos de decaimento.

Toxicidade	Elemento ou Nuclídeo	Órgão alvo	Efeito crítico	Limites de exposição (mg/m^3)	Limites de exposição (Bq)	
					Inalação	Ingestão
Quimiotoxicidade	Urânio	Rins	Falha renal	0.2 ^(USA)		
			Metalocarcinogénico (?)	0.25 ^(FRG)		
	Tório		Metalocarcinogénico (?)	0.05		
Radiotoxicidade	^{238}U	Osso	Sarcomas		3×10^4	5×10^5
	^{232}T	Osso	Sarcomas		1×10^2	3×10^4
	^{226}R	Osso	Sarcomas		2×10^4	7×10^4
	^{222}Ra	Pulmão	Cancro do pulmão		7×10^6	-
	^{210}Ch	Esqueleto, fígado	Cancro		9×10^3	2×10^4
	^{210}Po	Todo o corpo	Cancro		2×10^4	1×10^5

Tabela 9-4 – Efeitos críticos e limites de exposição ocupacional para o urânio, tório e produtos de decaimento.

Para os limites baseados na quimiotoxicidade do urânio, são apresentados valores adoptados pelas autoridades dos Estados Unidos da América (assinalados com USA) e da antiga República Federal Alemã (assinalados com FRG).

De referir que os valores de radiotoxicidade relativos ao radão, incluem as contribuições-dose dos isótopos filhos de vida curta.

De facto, as concentrações de gás radão são as mais preocupantes em termos de saúde pública, em particular na região centro do nosso País, “*grosso modo*” coincidente com a Província Uranífera das Beiras.

De facto, sendo o radão um gás radioactivo gerado na cadeia de decaimento do urânio, a exposição à sua acção pode ter lugar, tanto por inalação, como por ingestão, desde que o gás se encontre dissolvido na água subterrânea.

Ainda que o risco decorrente do consumo de radão na água subterrânea pareça ser substancialmente inferior ao relativo à sua inalação, a recomendação da Comissão Europeia relativa à protecção da população contra a exposição ao radão no abastecimento de água potável (2001/928/EURATOM, de 20/12/2001) aconselha o cumprimento de determinados limites, bem como a adopção de medidas quando os mesmos não são respeitados.

Têm sido levados a cabo diversos estudos, visando a caracterização das concentrações de radão nas águas subterrâneas da região centro de Portugal, tendo sido concluído, ainda que de forma preliminar, uma vez que o estudo deve alargar-se a outras áreas, que em aproximadamente 15 % das amostras analisadas, são excedidos os valores limites estabelecidos na recomendação da Comissão (*Pereira et. al, 2003*).

10. Caracterização hidrogeoquímica

Dados obtidos a partir do Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Mondego (*ARHCentro, 1999*) relativamente à qualidade da água subterrânea nesta bacia, permitem caracterizar genericamente as suas águas subterrâneas em função dos parâmetros Condutividade Eléctrica, pH, Nitrato, Bicarbonato, Cloreto, Sulfato, Cálcio, Magnésio, Sódio e SAR (Sodium Adsorption Rate, ou Taxa de Adsorção de Sódio), tal como definidos no Decreto-Lei 236/98. As águas do Maciço Hespérico, com excepção de algumas situações em que o pH se situa abaixo do mínimo estabelecido no intervalo do Valor Máximo Recomendável, não apresentam violações dos limites regulamentados.

Quanto à vulnerabilidade à poluição, esta encontra-se classificada de acordo com os termos de referência do plano de bacia, sendo que os sistemas aquíferos do Maciço Hespérico constituídos por granitos, pertencem à classe das rochas fissuradas e apresentam uma vulnerabilidade à poluição baixa a variável.

Os riscos associados às actividades desenvolvidas na bacia susceptíveis de afectar a qualidade da água subterrânea do local em apreço, relacionam-se com a exploração de recursos minerais metálicos (no caso vertente urânio) em que as técnicas utilizadas e o tipo de exploração – exploração a céu aberto, lixiviação ácida de minério pobre e presença de sulfuretos - favorecem a produção de Drenagem Ácida de Mina, mas também se relacionam com actividades industriais, designadamente com a indústria de enchidos, localizando-se nos arredores da área mineira uma pequena fábrica, cujos efluentes são drenados para as imediações da zona estudada.

10.1. Evolução geoquímica das águas

Levando em conta todos os resultados das análises efectuadas ao longo do tempo, foi já possível estabelecer um esboço evolutivo do quimismo das águas existentes na antiga área mineira de Castelejo (Capítulo 7). No entanto, no sentido de avaliar o seu comportamento recente, foram efectuadas 4 campanhas de amostragem, distribuídas pelos anos hidrológicos de 2008 e 2009. Os locais de amostragem (F1, F2, F10, PP1 e PP1A) foram escolhidos em função da sua localização – localizam-se fundamentalmente no Vale de Castelejo, principal eixo de escoamento da zona mineira – pelo que foram também utilizados no ensaio de traçagem.

As amostragens foram efectuadas nos anos hidrológicos de 2007/2008 e 2008/2009, nas datas seguintes:

- em 28/03/2008, no final do 1º semestre hidrológico do ano hidrológico de 2007/2008;
- em 26/09/2008, no final do 2º semestre hidrológico do ano hidrológico de 2007/2008;
- em 26/03/2009, no final do 1º semestre hidrológico do ano hidrológico de 2008/2009;
- em 25/09/2009, no final do 2º semestre hidrológico do ano hidrológico de 2008/2009;

Em cada um dos furos amostrados, procedeu-se à colheita de água a duas profundidades distintas – à superfície e em profundidade -, destinando-se as mesmas a análise laboratorial. Na mesma ocasião, as águas colhidas foram ainda submetidas a análises expeditas de campo para os parâmetros pH, Temperatura, Condutividade e Potencial Redox. Os resultados obtidos apresentam-se no Apêndice I, Tabelas AI-1 a AI-5 para as análises de campo, e Tabelas AI-6 a AI-11 para as análises de laboratório.

A caracterização da mineralização das águas em profundidade permitirá aferir da evolução da granulometria do aquífero instalado na caixa de falha situada no Vale do Castelejo, ou da eventual existência de contaminação em profundidade.

Quanto à caracterização da evolução, tanto qualitativa, como temporal, das águas subterrâneas existentes no subsolo da área mineira, recorrer-se-á à utilização de diagramas de Piper e Stiff.

Ir-se-á igualmente proceder à identificação das espécies de urânio presentes nas águas subterrâneas da área mineira. Com tal objectivo em vista, utilizar-se-ão as análises químicas disponíveis, com vista à prossecução da modelação hidrogeoquímica. Esta modelação será efectuada utilizando o programa PHREEQC, que permite proceder à especiação pretendida.

10.2. Caracterização das águas – dados de campo

Como atrás ficou dito, com vista à caracterização da mineralização das águas em profundidade, procedeu-se durante as campanhas de monitorização efectuadas, não apenas à colheita de amostras de águas subterrâneas em superfície e em profundidade, mas também à medição e recolha de alguns parâmetros relacionados com as mesmas.

Os parâmetros medidos - pH, Temperatura, Condutividade e Potencial Redox (Eh) – deveriam determinar-se em cada um dos 5 pontos de água utilizados na monitorização (F1, F2, F10, PP1 e PP1A). Contudo, após a realização do ensaio de traçagem, não foi possível voltar a efectuar medições no furo utilizado para injeção do traçador (com excepção do registo do nível da água, que foi sempre efectuado). Tal impossibilidade relaciona-se com a quantidade de uranina presente na água, que implicaria a contaminação dos aparelhos de medida.

Foram efectuadas duas colheitas em cada furo, uma relativa à água recolhida imediatamente abaixo do nível da água no furo (amostra superficial) e outra abaixo deste nível, a profundidade variável, de acordo com as características de cada furo (amostra de profundidade).

No Apêndice I apresentam-se as tabelas correspondentes a cada um dos furos contemplados na monitorização, onde se resumem as características de cada furo, bem como as profundidades aproximadas de recolha das amostras, entre outros dados.

A Tabela AI-1 (Apêndice I) refere-se ao Furo 1 (F1). Este furo foi aquele em que se verificou a injeção do traçador utilizado no ensaio de traçagem. Por esta razão apenas foi efectuada a primeira amostragem, que teve lugar em data ainda anterior ao ensaio de traçagem, uma vez que, como acima ficou dito, nas amostragens subsequentes a quantidade de uranina presente na água inviabilizou novas colheitas, pelo que não é possível observar a evolução de qualquer parâmetro neste furo.

Com base nos dados constantes das tabelas AI-2, AI-3, AI-4 e AI-5 elaboraram-se diversos gráficos, que reflectem a evolução das águas amostradas relativamente a cada um dos parâmetros medidos, os quais seguidamente analisaremos.

10.2.1. pH

A Tabela AI-2 (Apêndice I) refere-se ao Furo 2 (F2). Com base nesta tabela foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 10-1, que reflecte a evolução do pH nas amostras recolhidas, quer à superfície da coluna da água, quer em profundidade.

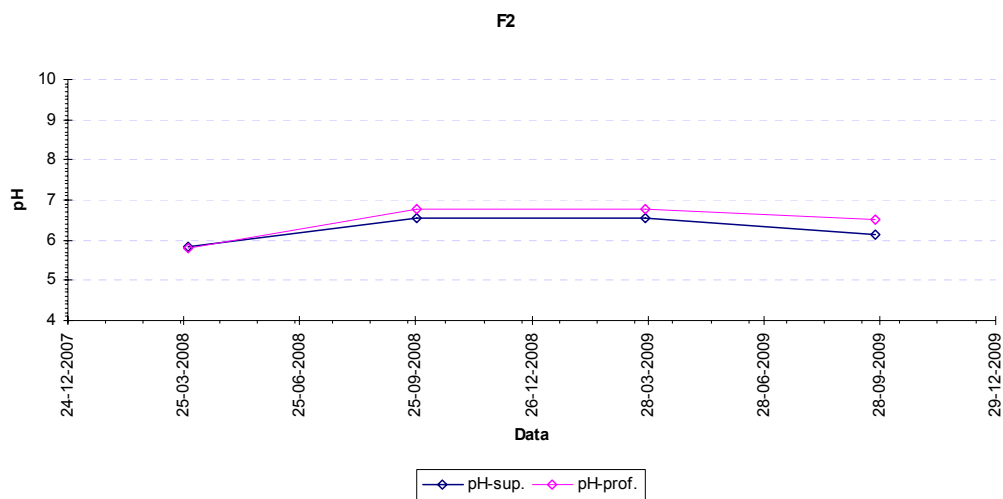


Figura 10-1 – Evolução do pH no furo F2 durante as amostragens efectuadas.

Com base na Tabela AI-3 (Apêndice I) referente ao Furo 10 (F10) foi elaborado o gráfico que se apresenta na Figura 10-2.

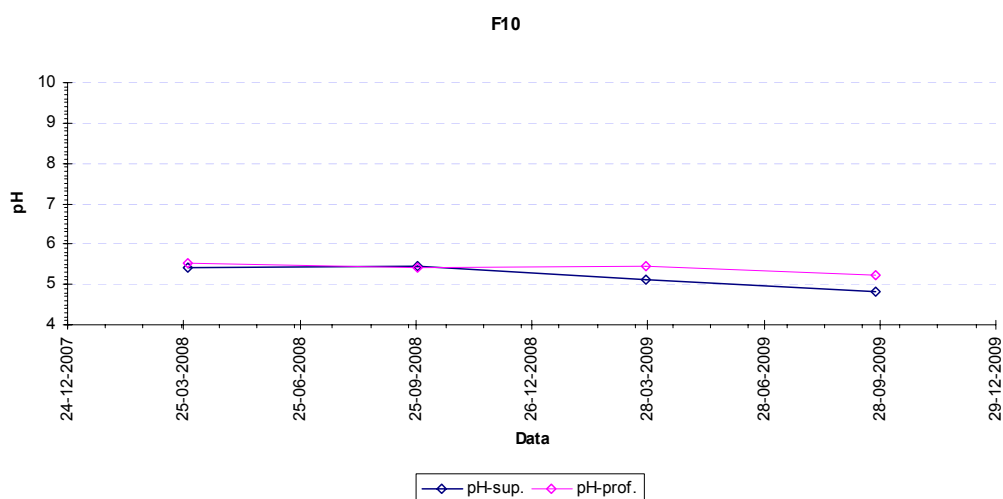


Figura 10-2 – Evolução do pH no furo F10 durante as amostragens efectuadas.

Com base na Tabela AI-4 (Apêndice I) referente ao Furo PP1 (PP1) foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 10-3.

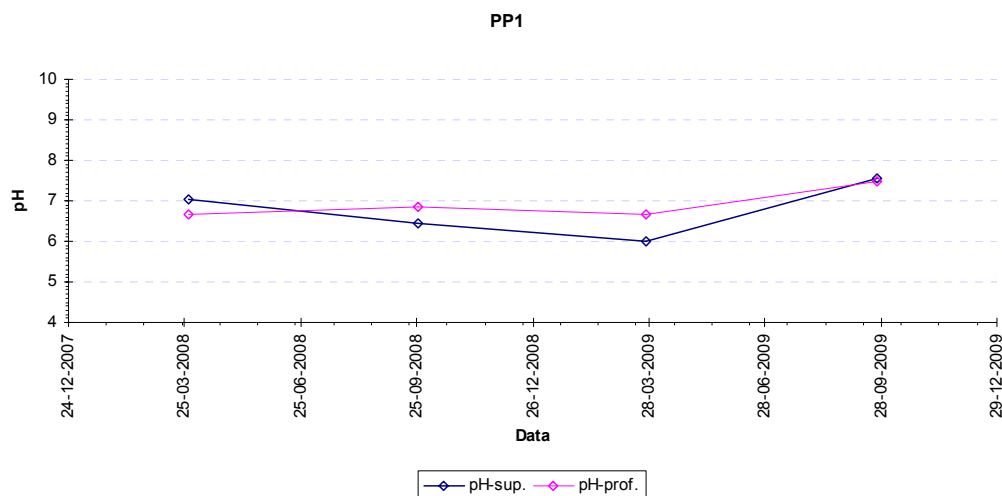


Figura 10-3 – Evolução do pH no furo PP1 durante as amostragens efectuadas.

Na Figura 10-4 apresenta-se o gráfico elaborado com base na Tabela AI-5 (Apêndice I) referente ao Furo PP1A (PP1A).

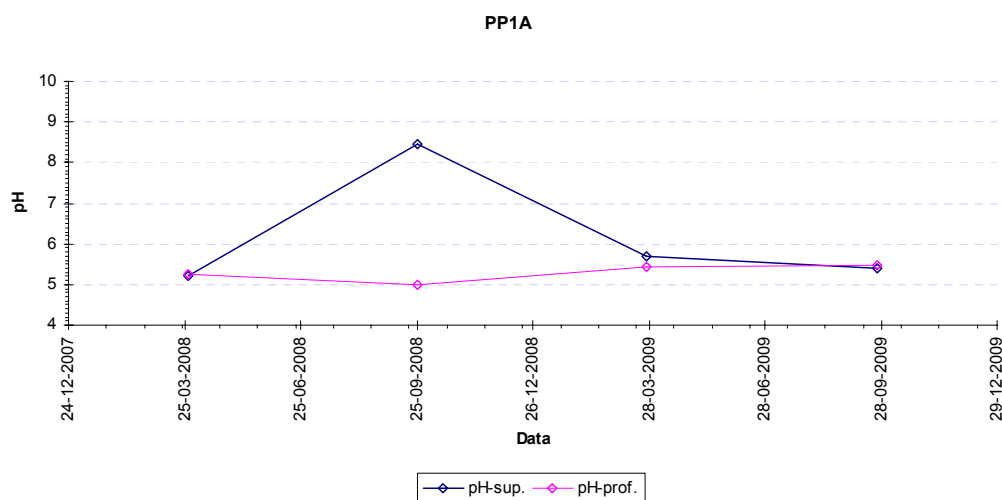


Figura 10-4 – Evolução do pH no furo PP1A durante as amostragens efectuadas.

Com excepção do furo PP1A, na generalidade das amostras as águas superficiais tendem a apresentar valores ligeiramente mais ácidos do que as profundas. Tal poderá repercutir o ambiente natural, potenciando a proximidade do contacto com a atmosfera uma maior acidez em superfície do que em profundidade.

Quanto ao furo PP1A, verifica-se a ocorrência de um valor elevado de pH na amostragem de superfície ocorrida em Setembro de 2008. Pelo facto de o Céu Aberto II ter estado sem tratamento durante todo o Verão de 2008, tendo a estação de tratamento transbordado e enviado efluente directamente para a rede de drenagem, colocou-se mesmo a possibilidade da água do Céu Aberto II ter estado a alimentar este furo, até porque o nível da água parecia anormalmente elevado, ao contrário da tendência geral de níveis baixos que então se faziam sentir. No entanto, por comparação com o valor registado na análise de laboratório, veio a concluir-se tratar-se de um valor anómalo, resultante de deficiente determinação.

10.2.2. Temperatura

A Tabela AI-2 (Apêndice I) refere-se a F2. Com base nesta tabela foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 10-5, que reflecte a evolução da Temperatura nas amostras recolhidas, quer à superfície da coluna da água, quer em profundidade.

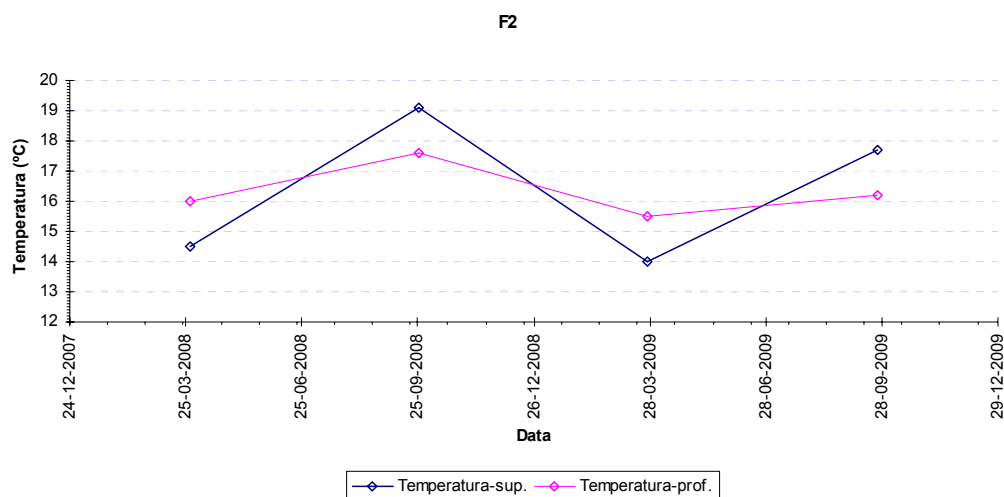


Figura 10-5 – Evolução da Temperatura no furo F2 durante as amostragens efectuadas.

Com base na Tabela AI-3 (Apêndice I) referente a F10, foi elaborado o gráfico que se apresenta na Figura 10-6.

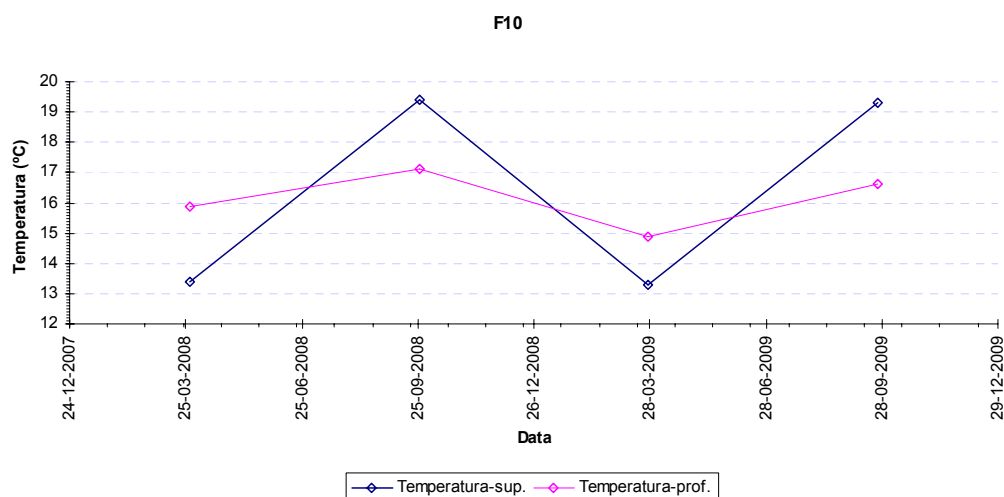


Figura 10-6 – Evolução da Temperatura no furo F10 durante as amostragens efectuadas.

Com base na Tabela AI-4 (Apêndice I) referente a PP1 foi elaborado o gráfico constante da Figura 10-7.

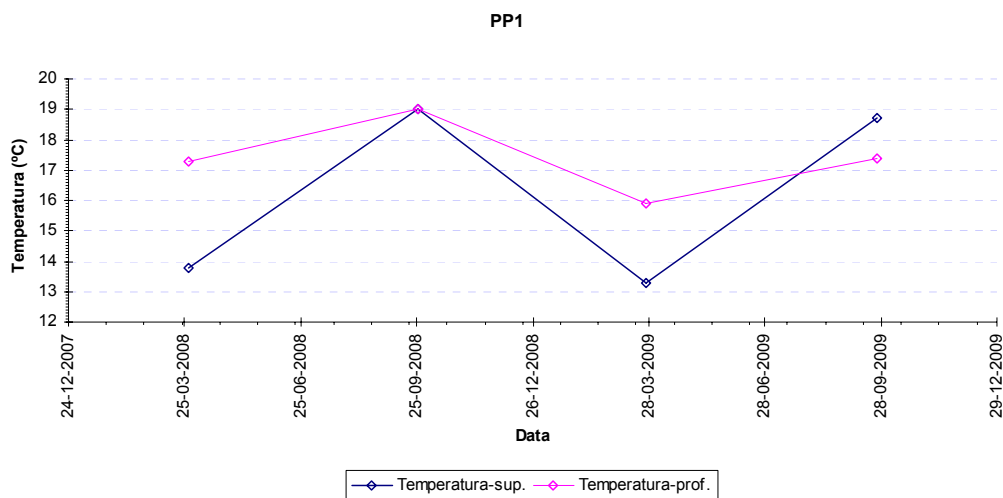


Figura 10-7 – Evolução da Temperatura no furo PP1 durante as amostragens efectuadas.

Na Figura 10-8 apresenta-se o gráfico elaborado com base na Tabela AI-5 (Apêndice I) relativo a PP1A.

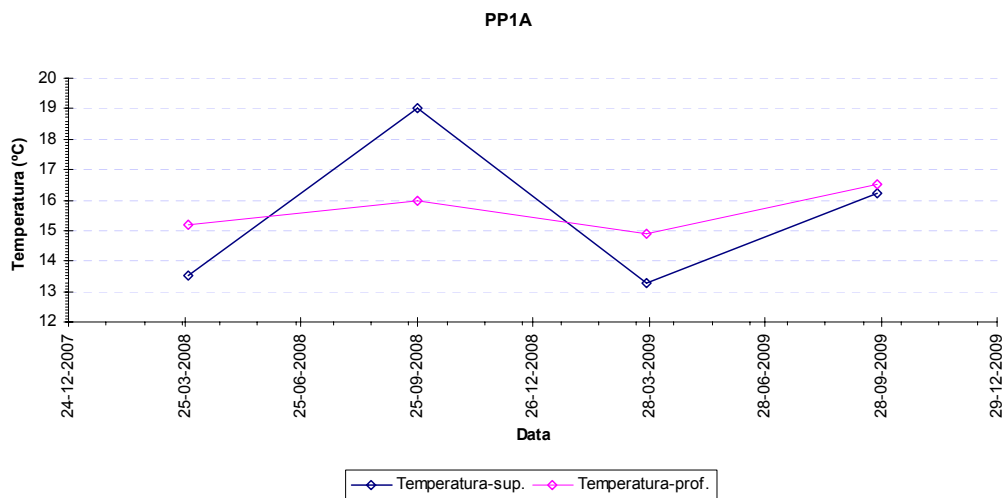


Figura 10-8 – Evolução da Temperatura no furo PP1A durante as amostragens efectuadas.

A evolução das Temperaturas registadas em todos os furos afigura-se-nos seguir um padrão comum.

Relativamente às amostras colhidas em superfície este padrão parece-nos temporal, reproduzindo de forma aproximada a evolução da temperatura ambiente.

Já no que toca às amostras colhidas em profundidade, o padrão seguido reflecte alguma atenuação na oscilação da temperatura, correspondente à menor influência da temperatura ambiente devido ao maior isolamento daquelas águas em relação às águas de superfície.

10.2.3. Potencial Redox (Eh)

A Tabela AI-2 (Apêndice I) refere-se a F2. Com base nesta tabela foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 10-9, que reflecte a evolução do Eh nas amostras recolhidas, quer à superfície da coluna da água, quer em profundidade.

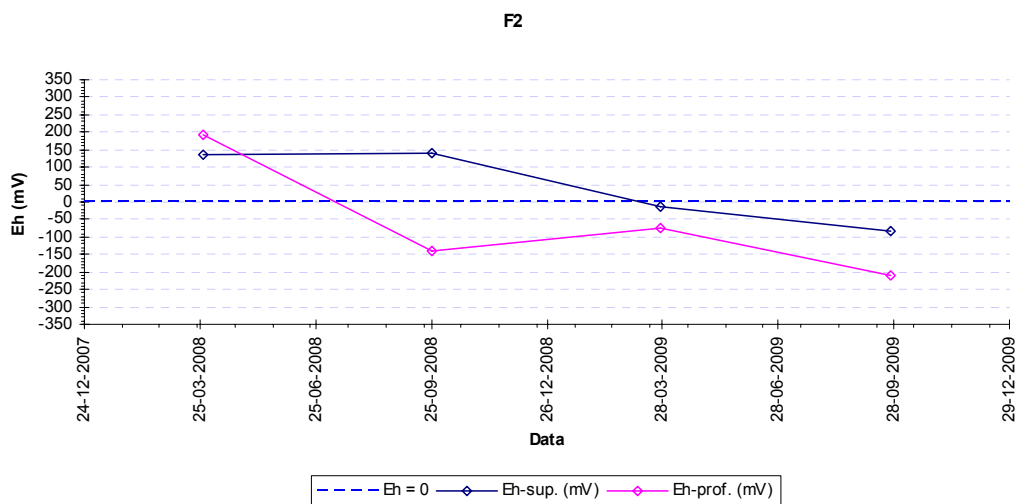


Figura 10-9 – Evolução do Eh no furo F2 durante as amostragens efectuadas.

Com base na Tabela AI-3 (Apêndice I) referente a F10, foi elaborado o gráfico que se apresenta na Figura 10-10.

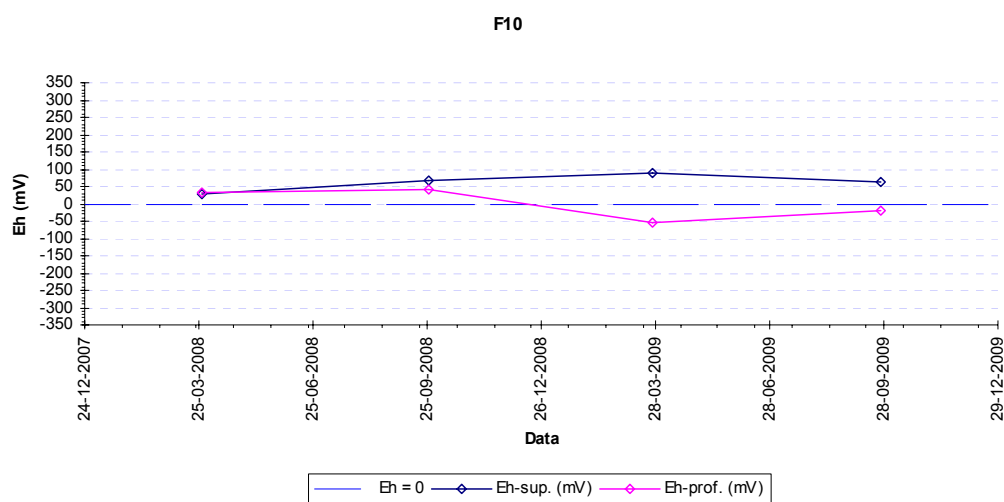


Figura 10-10 – Evolução do Eh no furo F10 durante as amostragens efectuadas.

Com base na Tabela AI-4 (Apêndice I) referente a PP1 foi elaborado o gráfico constante da Figura 10-11.

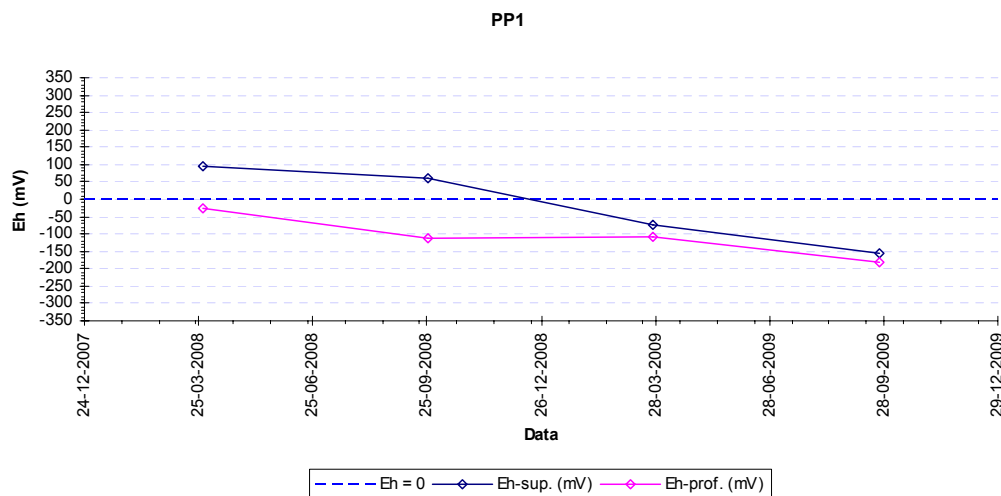


Figura 10-11 – Evolução do Eh no furo PP1 durante as amostragens efectuadas.

Na Figura 10-12 apresenta-se o gráfico elaborado com base na Tabela AI-5 (Apêndice I) relativo a PP1A.

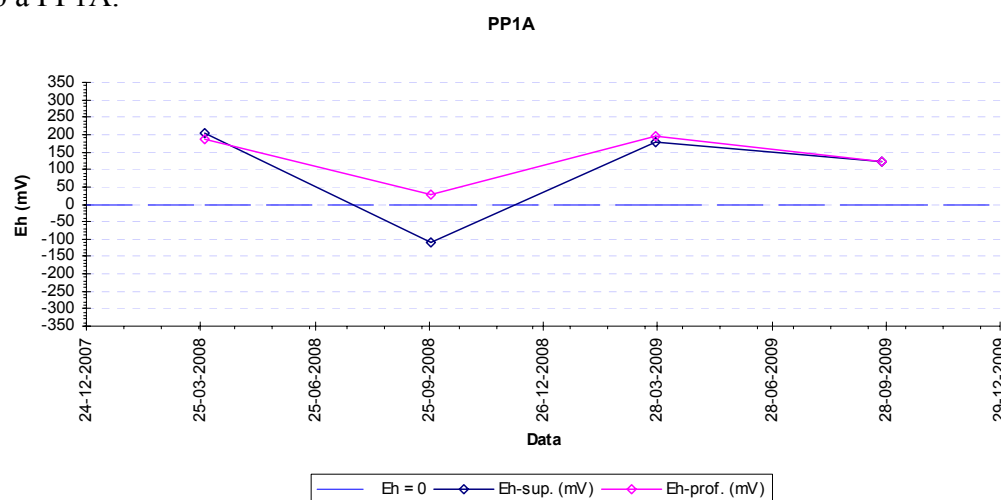


Figura 10-12 – Evolução do Eh no furo PP1A durante as amostragens efectuadas.

Na linha do que atrás ficou dito em relação à evolução temporal do parâmetro Temperatura, embora com as devidas adaptações, afigura-se-nos que a evolução do Eh segue um padrão comum. De facto, à excepção do furo PP1A, todos os furos apresentam valores de Eh mais elevados para as águas colhidas em superfície do que para as águas colhidas em profundidade, o que parece ser normal, atendendo ao facto de o ambiente dever, em princípio, apresentar-se mais oxidante (ou menos redutor) em superfície do que em profundidade.

Já quanto à situação verificada no furo PP1A, em que parece verificar-se o contrário, o odor por este exalado parece indiciar uma eventual presença de ácido sulfídrico, sendo o ambiente aparentemente redutor. O ácido sulfídrico será gerado a partir da redução de sulfatos através de microorganismos sulfato-redutores. Por outro lado, como já foi referido, o facto do Céu Aberto II ter estado sem tratamento durante todo o Verão de 2008, tendo a estação de tratamento transbordado e enviado efluente directamente para a rede de drenagem, coloca a possibilidade desta água ter estado a alimentar este furo, o que poderá ter alterado sensivelmente as condições de oxirredução localmente prevalecentes.

10.2.4. Condutividade

A Tabela AI-2 (Apêndice I) refere-se a F2. Com base nesta tabela foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 10-13, que reflecte a evolução da Condutividade nas amostras recolhidas, quer à superfície da coluna da água, quer em profundidade.

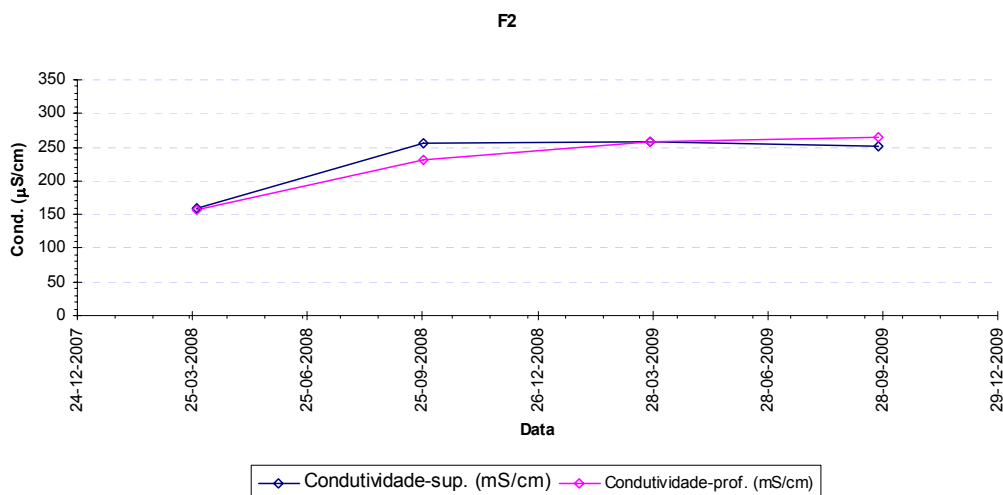


Figura 10-13 – Evolução da Condutividade no furo F2 durante as amostragens efectuadas.

Com base na Tabela AI-3 (Apêndice I) referente a F10, foi elaborado o gráfico que se apresenta na Figura 10-14.

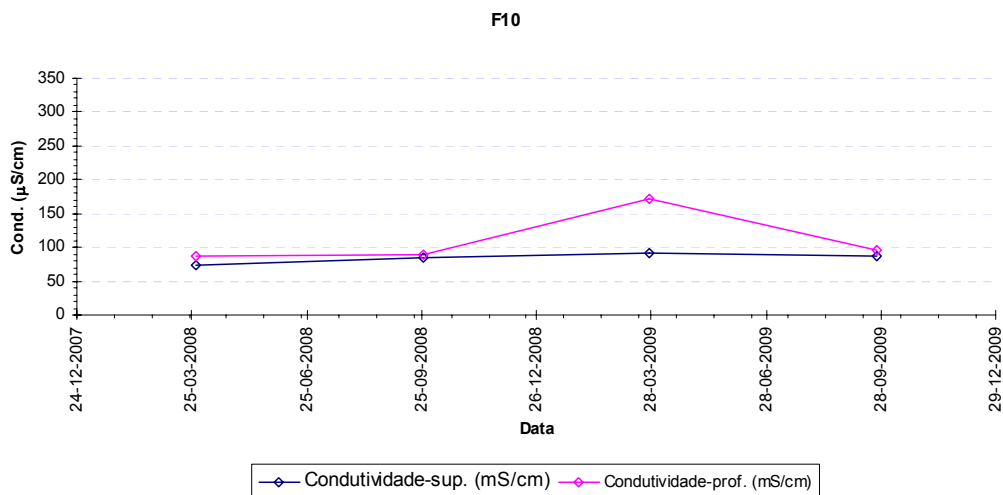


Figura 10-14 – Evolução da Condutividade no furo F10 durante as amostragens efectuadas.

Com base na Tabela AI-4 (Apêndice I) referente a PP1 foi elaborado o gráfico constante da Figura 10-15.

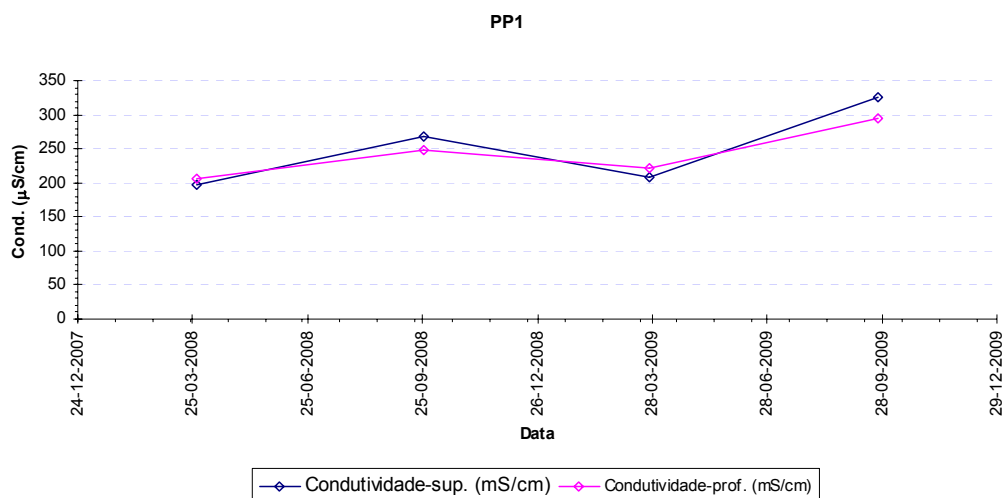


Figura 10-15 – Evolução da Condutividade no furo PP1 durante as amostragens efectuadas.

Na Figura 10-16 apresenta-se o gráfico elaborado com base na Tabela AI-5 (Apêndice I) relativo a PP1A.

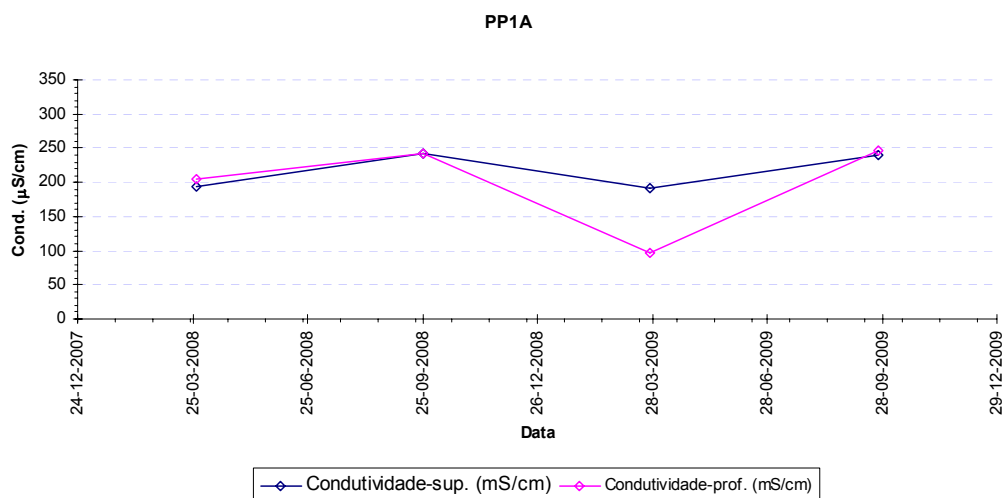


Figura 10-16 – Evolução da Condutividade no furo PP1A durante as amostragens efectuadas.

Da prospecção geofísica realizada ao longo do vale de falha do Castelejo (Cap. 5) verificou-se que, em todos os perfis efectuados, os valores de resistividade diminuíam em profundidade. As explicações para tal facto poderiam dever-se a causas naturais (camadas mais alteradas em profundidade, atendendo ao facto de nos encontrarmos sobre um vale de falha) ou a uma eventual situação de contaminação profunda com Drenagem Ácida de Mina, provocando um aumento da mineralização.

Podemos agora, com recurso à interpretação da evolução dos valores de condutividade, confirmar, ou não, esta última hipótese.

Assim, tendo em conta a oposição verificada entre resistividade e condutividade, se os valores de resistividade diminuem em profundidade, os valores de condutividade devem aumentar.

Analisando a evolução dos valores de condutividade nos diversos furos, verificamos que em F2, PP1 e PP1A esta situação não acontece, isto é, não existe um padrão definido para a evolução da condutividade da superfície para a profundidade.

Por outro lado, em F10, em todas as amostragens se verifica um aumento, ainda que pouco pronunciado, da condutividade da superfície para a profundidade.

Desta forma, somos de opinião que a volubilidade das tendências verificadas nos furos F2, PP1 e PP1A traduz uma alteração das condições físico-químicas do sistema, em resultado de uma situação de contaminação intermitente ou sazonal, de acordo com as condições existentes no subsolo das imediações da mina em cada momento (quantidade de contaminantes presentes, concentração dos mesmos, condições atmosféricas).

O aumento da condutividade da superfície para a profundidade verificado em F10, permite apoiar a hipótese da existência de uma contaminação de fundo naquele ponto.

10.3. Caracterização das águas – dados de laboratório

Para além da caracterização sucinta já efectuada, foram igualmente efectuadas colheitas de amostras de águas subterrâneas em superfície e em profundidade, destinadas a análise laboratorial.

Os parâmetros medidos são agora mais alargados – Condutividade eléctrica e pH, ambos determinados no laboratório, CO₂, Alcalinidade, Dureza Total, Ca²⁺, Na⁺, Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻ e U – e, por não ter sido possível a realização de colheitas no Furo 1 após a injeção do traçador pelas razões antes apresentadas, foram determinados neste furo apenas numa das quatro campanhas realizadas.

Tal como anteriormente descrito, foram efectuadas duas colheitas em cada furo, uma relativa à água recolhida imediatamente abaixo do nível da água no furo (amostra superficial) e outra abaixo deste nível, a profundidade variável, de acordo com as características de cada furo (amostra de profundidade).

No Apêndice I apresentam-se as tabelas correspondentes a cada um dos furos contemplados na monitorização (Tabelas AI-6 a AI-11).

Com base nos dados constantes das tabelas referidas, foram elaborados diversos gráficos, que reflectem a evolução das águas relativamente aos parâmetros medidos, os quais seguidamente passaremos a interpretar.

10.3.1. Diagramas de Piper

Os diagramas de Piper representam uma forma de projectar diversas amostras de águas, permitindo interpretá-las de acordo com a sua fácies hidrogeoquímica, entendendo-se por fácies hidrogeoquímicas os corpos de água subterrânea, num aquífero, que apresentam diferente composição química, variando esta em função da litologia, cinética da solução e padrões de fluxo do aquífero (Fetter, 1994).

A fácies hidrogeoquímica classifica-se com base nos iões dominantes presentes numa água, através da sua projecção em dois diagramas triangulares, um destinado a acolher a percentagem de cationes e o outro a percentagem de aniões.

Os pontos obtidos nos diagramas triangulares são depois projectados num losango central, resultando da sua intersecção a composição final da amostra em termos de cationes e aniões (Figura 10-17).

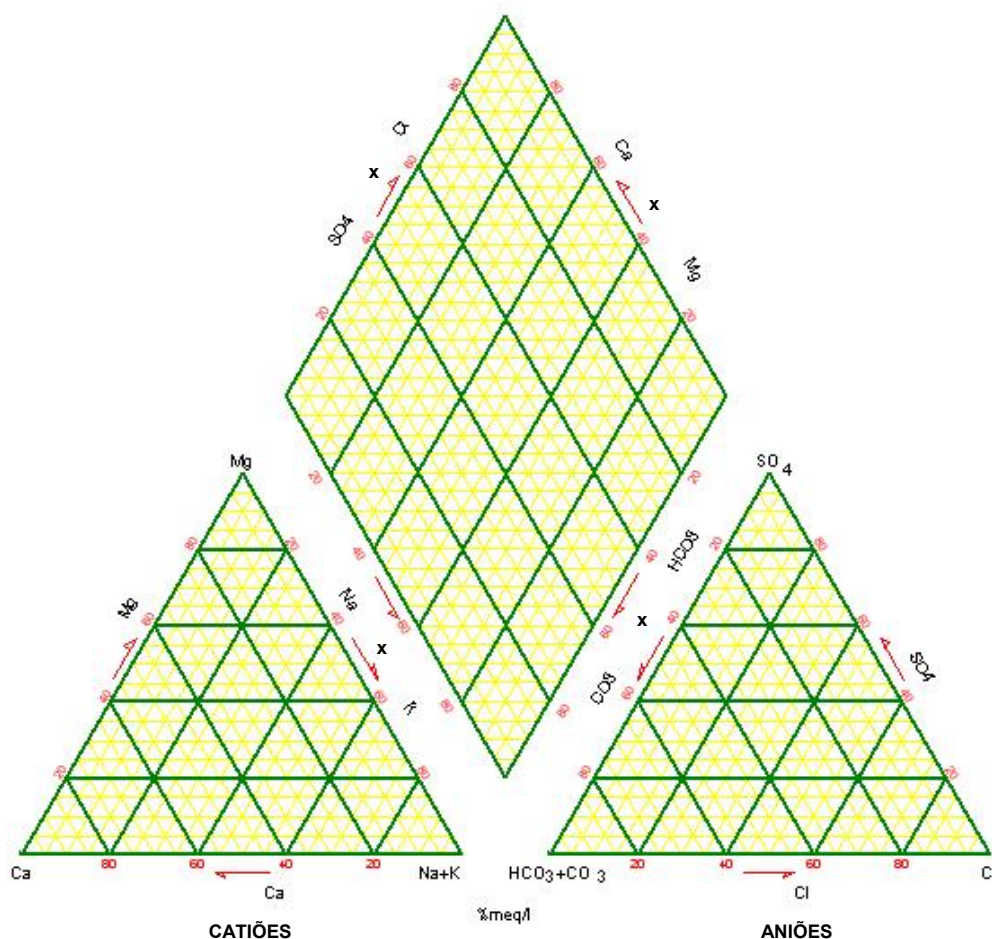


Figura 10-17 – Diagrama de Piper.

O diagrama de Piper relativo às duas amostras colhidas no Furo 1 apresenta-se na Figura 10-18. De novo se refere que as amostras relativas ao Furo 1 são apenas duas (referentes à colheita superficial e à colheita em profundidade efectuadas em 28 de Março de 2008) pois este furo foi aquele em que se verificou a injeção do traçador utilizado no ensaio de traçagem, tendo por esta razão sido aqui apenas efectuada a primeira das quatro campanhas de amostragem, a qual teve lugar em data ainda anterior à realização daquele ensaio (nas amostragens subsequentes a quantidade de traçador presente na água inviabilizou novas colheitas, pelo que não foi possível observar a evolução de qualquer parâmetro neste furo).

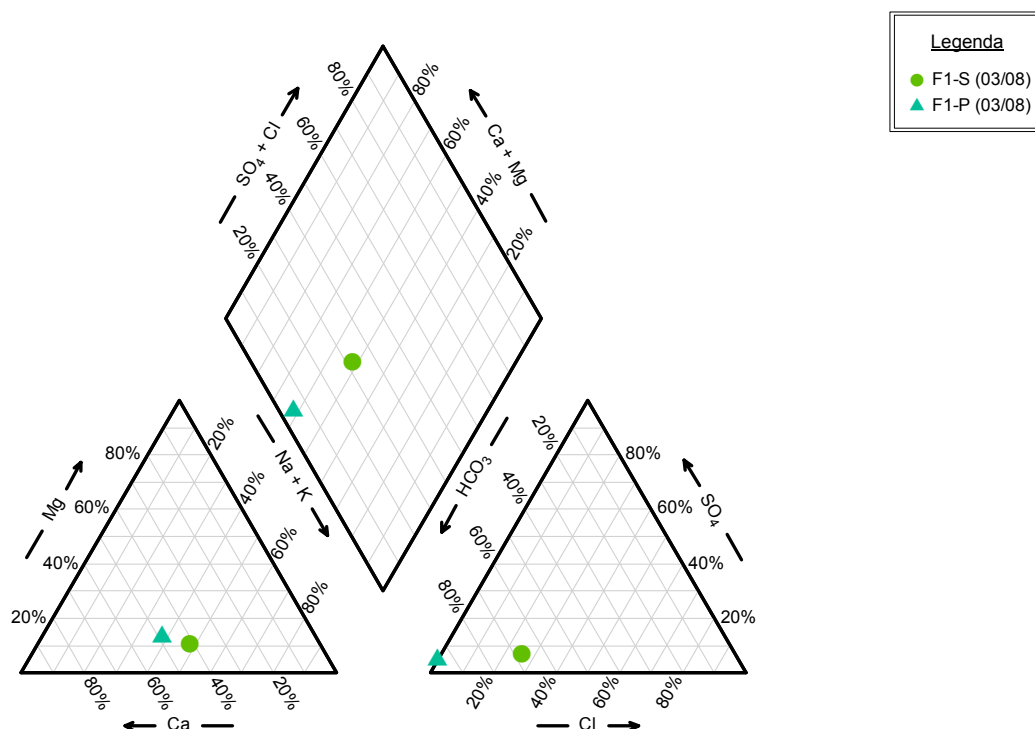


Figura 10-18 – Diagrama de Piper relativo às amostras colhidas no Furo 1.

Pode ver-se que ambas as águas são do tipo bicarbonatado misto, tendendo a amostra superficial para bicarbonatada sódica e a colhida em profundidade para bicarbonatada cálcica (embora sem um tipo catiónico dominante, isto é, nenhum dos catiões se encontra presente em percentagem superior a 50 %).

Na Figura 10-19 apresenta-se o diagrama de Piper relativo às amostras colhidas no Furo 2.

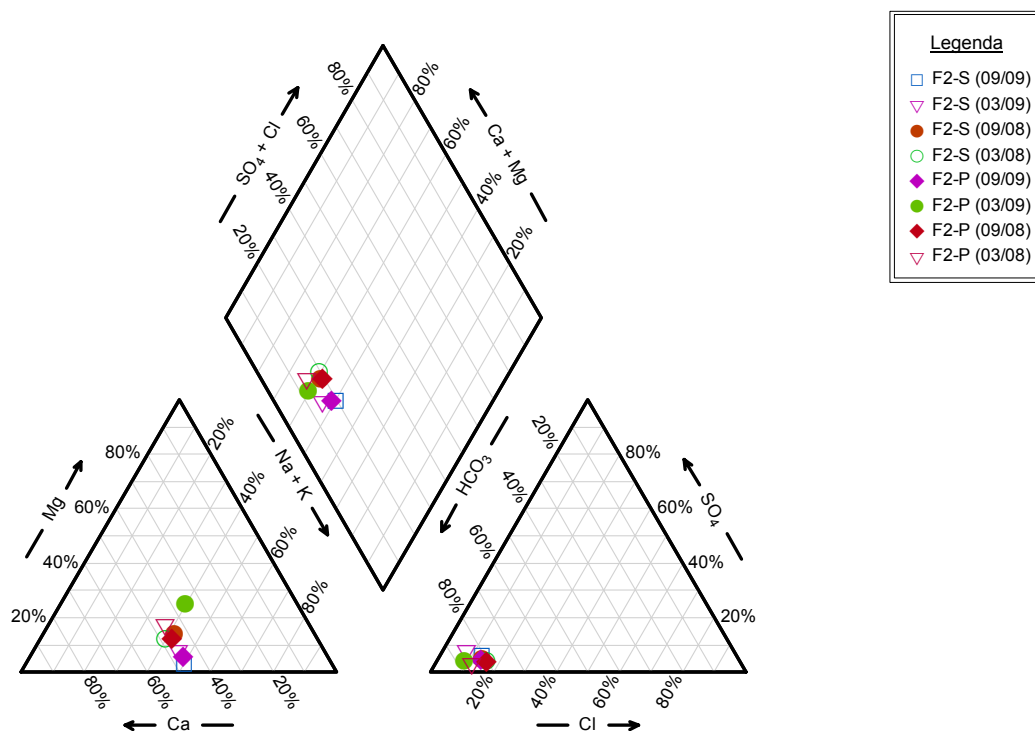


Figura 10-19 – Diagrama de Piper relativo às amostras colhidas no Furo 2.

Todas as amostras são do tipo bicarbonatado misto, sem tipo catiónico dominante, aliás em concordância com o que atrás ficou dito em relação ao Furo 1.

O diagrama de Piper relativo às duas amostras colhidas no Furo 10 apresenta-se na Figura 10-20.

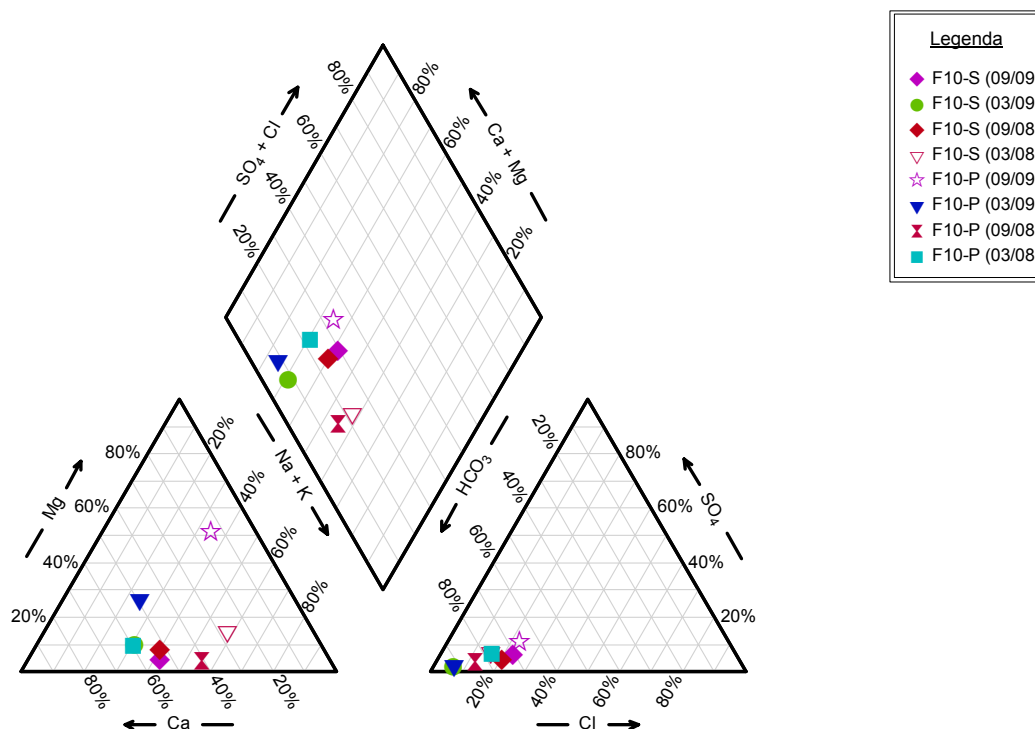


Figura 10-20 – Diagrama de Piper relativo às amostras colhidas no Furo 10.

Também em relação ao Furo 10 se verifica que todas as amostras são do tipo aniónico bicarbonatado. A amostra colhida em profundidade em Março de 2009 é do tipo catiónico misto, a colhida em superfície em Março de 2008 é do tipo catiónico sódico, a colhida em profundidade em Setembro de 2008 é também do tipo sódico, a colhida em profundidade em Setembro de 2009 é do tipo magnesiano e as restantes são bicarbonatadas cálcicas.

Vamos agora analisar o comportamento dos Furos PP1 e PP1A. O diagrama de Piper relativo ao Furo PP1 apresenta-se na Figura 10-21.

Mais uma vez se verifica que todas as amostras são do tipo bicarbonatado. As amostras colhidas, tanto em superfície, como em profundidade, em Março de 2008, são do tipo misto, ou seja, não exibem tipo catiónico dominante, enquanto que todas as restantes são do tipo sódico (ou sódico-potássico).

Quanto às amostras colhidas no furo PP1A, os resultados da sua projecção em diagrama de Piper apresentam-se na Figura 10-22.

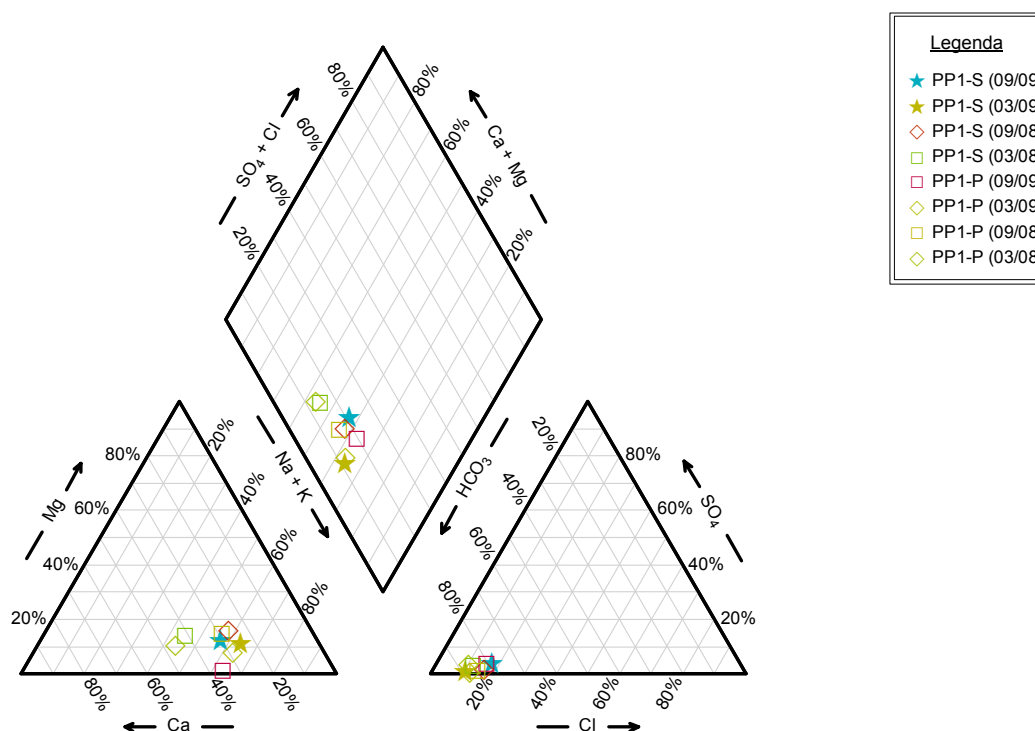


Figura 10-21 – Diagrama de Piper relativo às amostras colhidas no Furo PP1.

Vê-se no diagrama referente ao Furo PP1A que todas as amostras exibem uma fácies hidrogeoquímica diversa das fácies anteriormente apresentadas, o que revela a sua exposição a diferentes condições ambientais. Com efeito, todas elas são do tipo aniónico sulfatado. As amostras colhidas, tanto em superfície, como em profundidade, em Março de 2008, bem como a amostra colhida em profundidade em Setembro de 2009, são do tipo cálcico, enquanto que todas as restantes são do tipo misto (sem catião dominante).

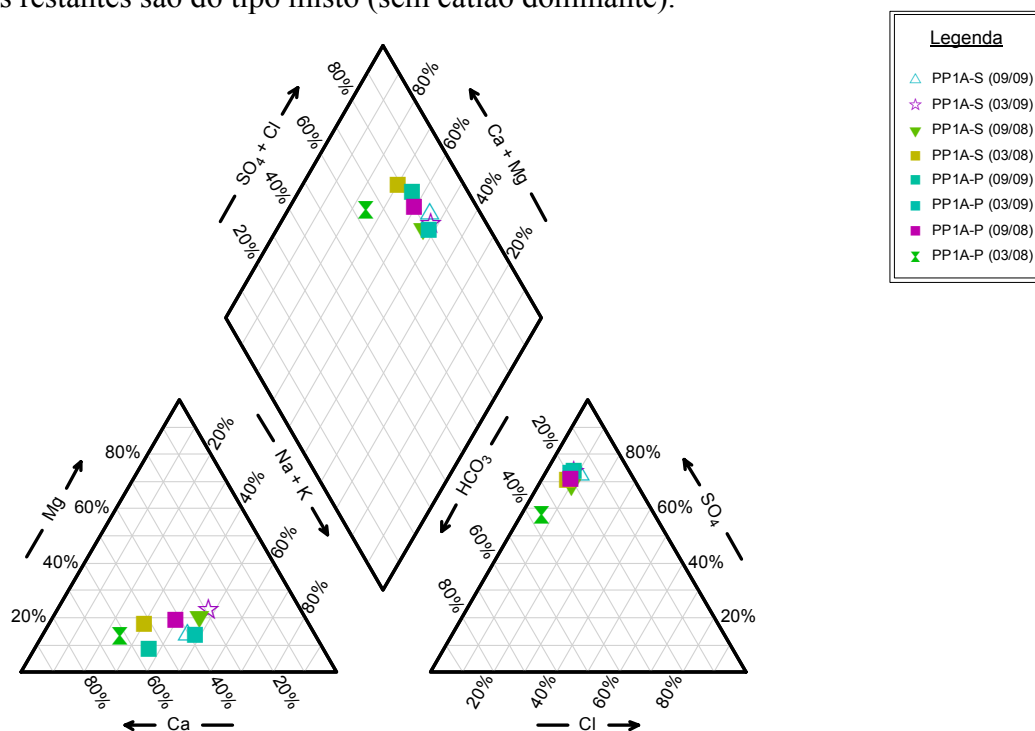


Figura 10-22 – Diagrama de Piper relativo às amostras colhidas no Furo PP1A.

Das condições que favorecem a situação prevalecente no Furo PP1A parecem fazer parte a infiltração de soluções com elevado teor de sulfatos nas águas ali existentes. Tal facto poderá dever-se a razões já oportunamente referidas, relacionadas com os processos de lixiviação ácida que tiveram lugar no local, e consistiam na lixiviação de minério pobre com ácido sulfúrico, no sentido de recuperar o urânio presente nos licores enriquecidos neste metal, obtidos após lixiviação.

Assim, não será de excluir a eventual migração de ácido ainda retido no subsolo para este furo, atendendo ao facto do mesmo se situar na intersecção de duas fracturas, que se constituem como eixos de escoamento preferencial da água subterrânea.

10.3.2. Diagramas de Stiff

Vamos agora proceder a uma abordagem diferente dos resultados obtidos, no sentido de obter uma visão espacial da evolução das águas. Desta forma, faremos corresponder a cada uma das quatro campanhas de amostragem uma imagem da evolução espacial da águas amostradas.

Na Figura 10-23 representa-se um diagrama de Stiff.

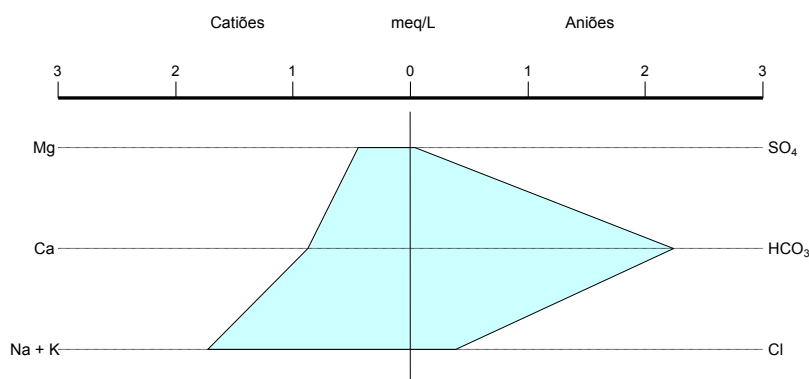


Figura 10-23 – Diagrama de Stiff.

O diagrama de Stiff é uma forma poligonal representada sobre três ou quatro eixos horizontais (três eixos horizontais no caso representado na Figura 10-23) que se desenvolvem para cada lado de um eixo vertical que funciona como origem. Os cations projectam-se do lado esquerdo e os aniões do lado direito da origem.

A representação faz-se em termos espaciais, projectando-se sobre cada local o diagrama de Stiff correspondente à amostra aí colhida.

Na Figura 10-24 representa-se a área mineira, bem como os furos de monitorização nela implantados, a fim de melhor enquadrar as figuras seguintes.

Para cada ponto, apresentam-se dois diagramas. O diagrama superior refere-se à colheita superficial e o diagrama inferior é referente à amostra colhida em profundidade. Torna-se, assim, possível obter uma visão de conjunto sobre a totalidade das amostras que integram a campanha de amostragem em apreço.

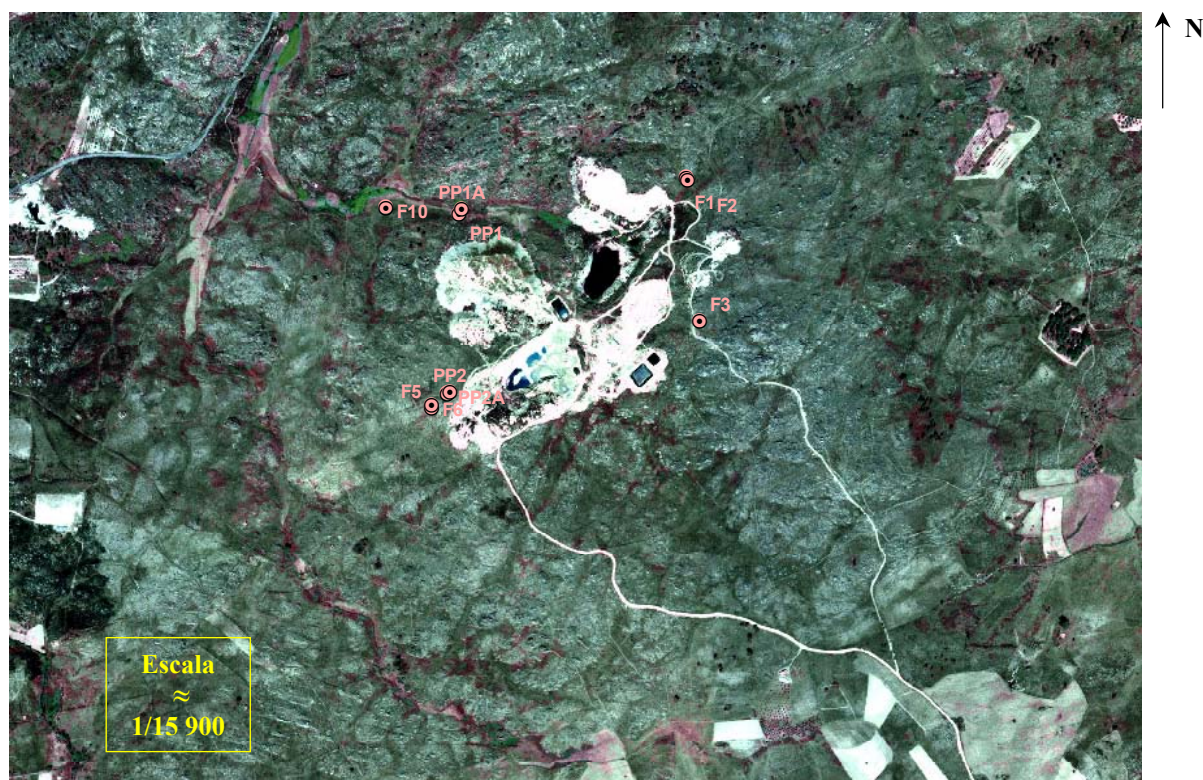


Figura 10-24 – Planta aérea da área mineira e localização dos furos de monitorização.

Na Figura 10-25 apresenta-se a área mineira com sobreposição dos diagramas de Stiff relativos às águas colhidas aquando da primeira campanha de monitorização, realizada em Março de 2008.

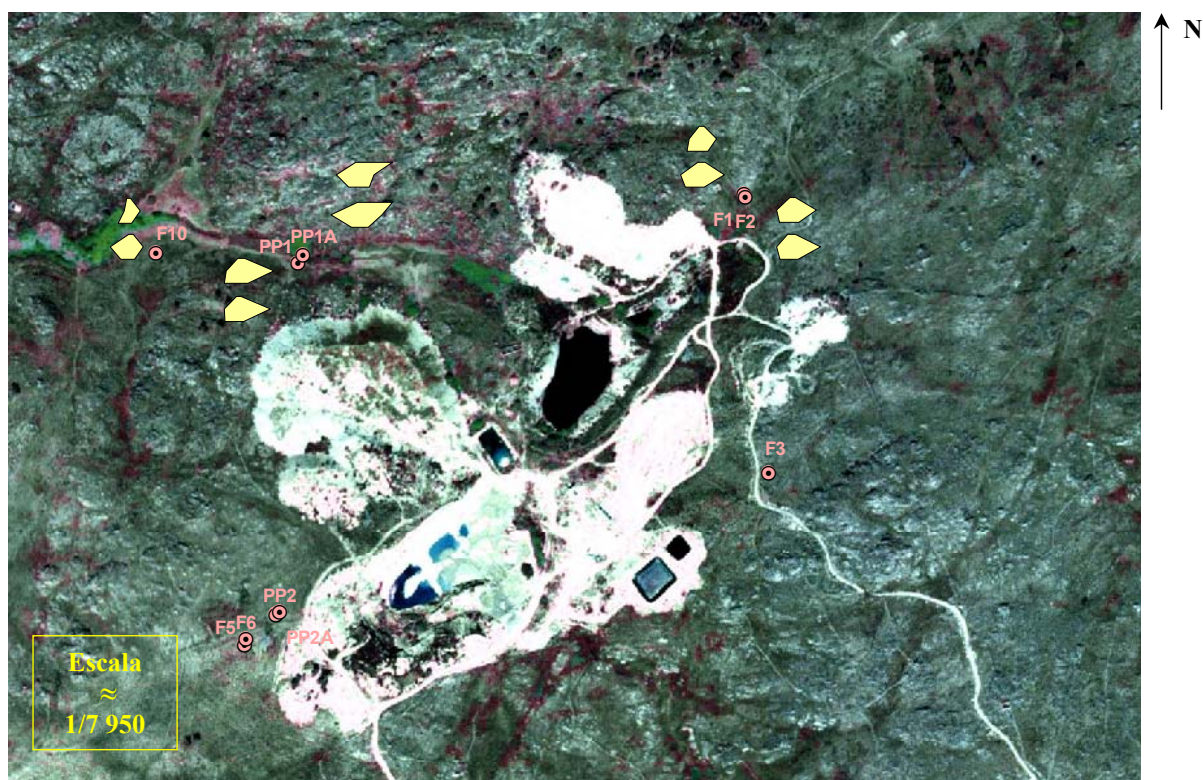


Figura 10-25 – Diagramas de Stiff relativos às amostras colhidas na campanha de monitorização de Março de 2008.

Na Figura 10-26 apresentam-se os diagramas de Stiff relativos às águas colhidas na segunda campanha de monitorização, realizada em Setembro de 2008.

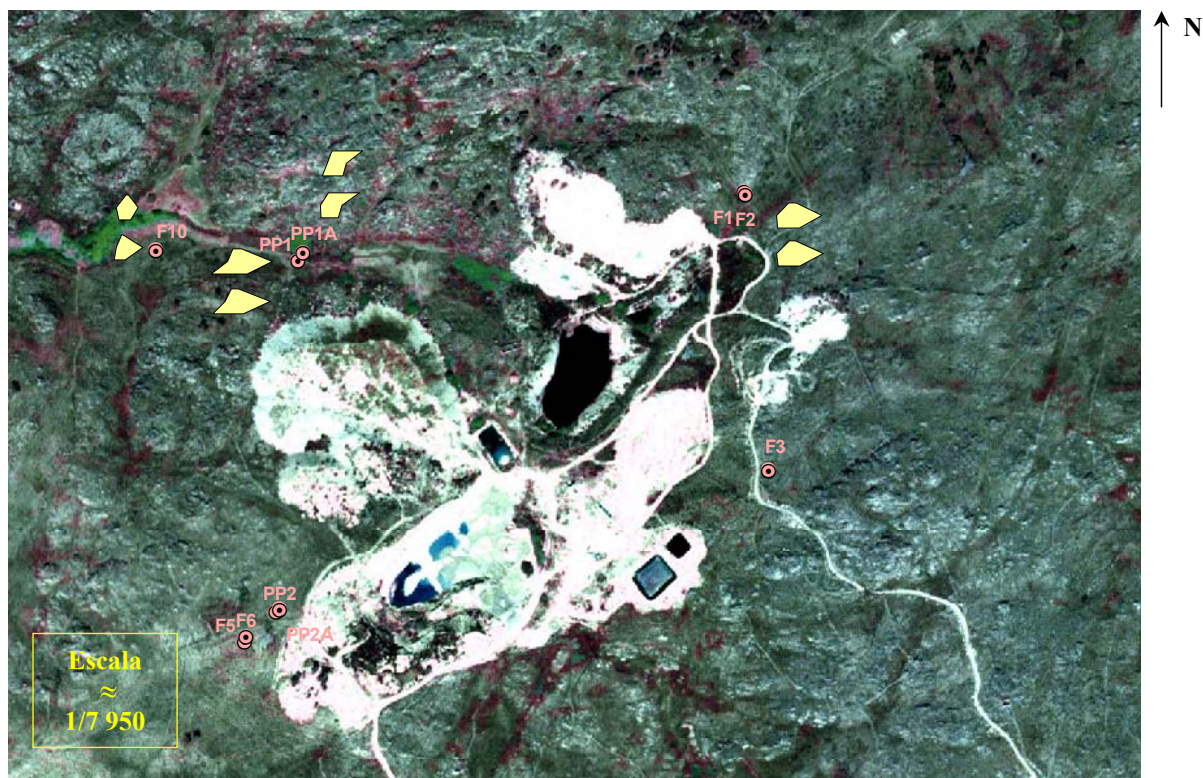


Figura 10-26 – Diagramas de Stiff relativos às amostras colhidas na campanha de monitorização de Setembro de 2008.

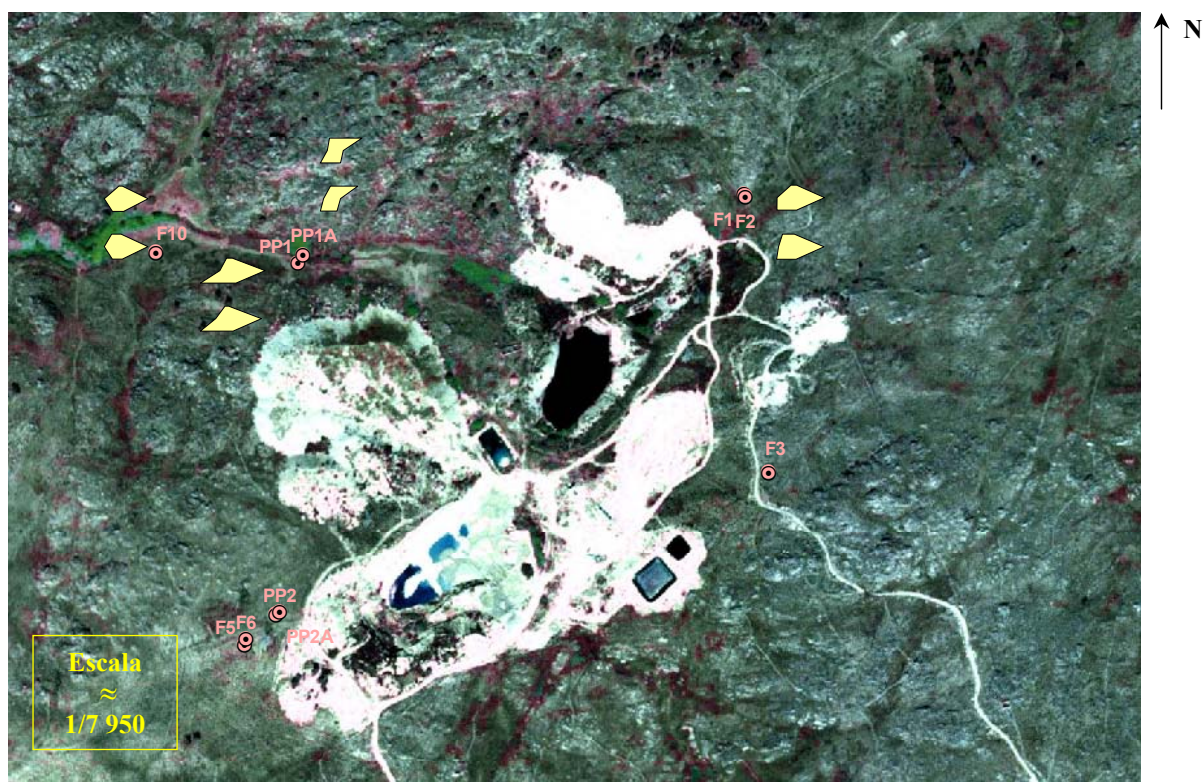


Figura 10-27 – Diagramas de Stiff relativos às amostras colhidas na campanha de monitorização de Março de 2009.

Na Figura 10-27 apresentam-se os diagramas de Stiff relativos às águas colhidas aquando da terceira campanha de monitorização, que teve lugar em Março de 2009.

Os diagramas de Stiff relativos às águas colhidas por ocasião da quarta e última campanha de monitorização, realizada em Setembro de 2009, apresentam-se na Figura 10-28.

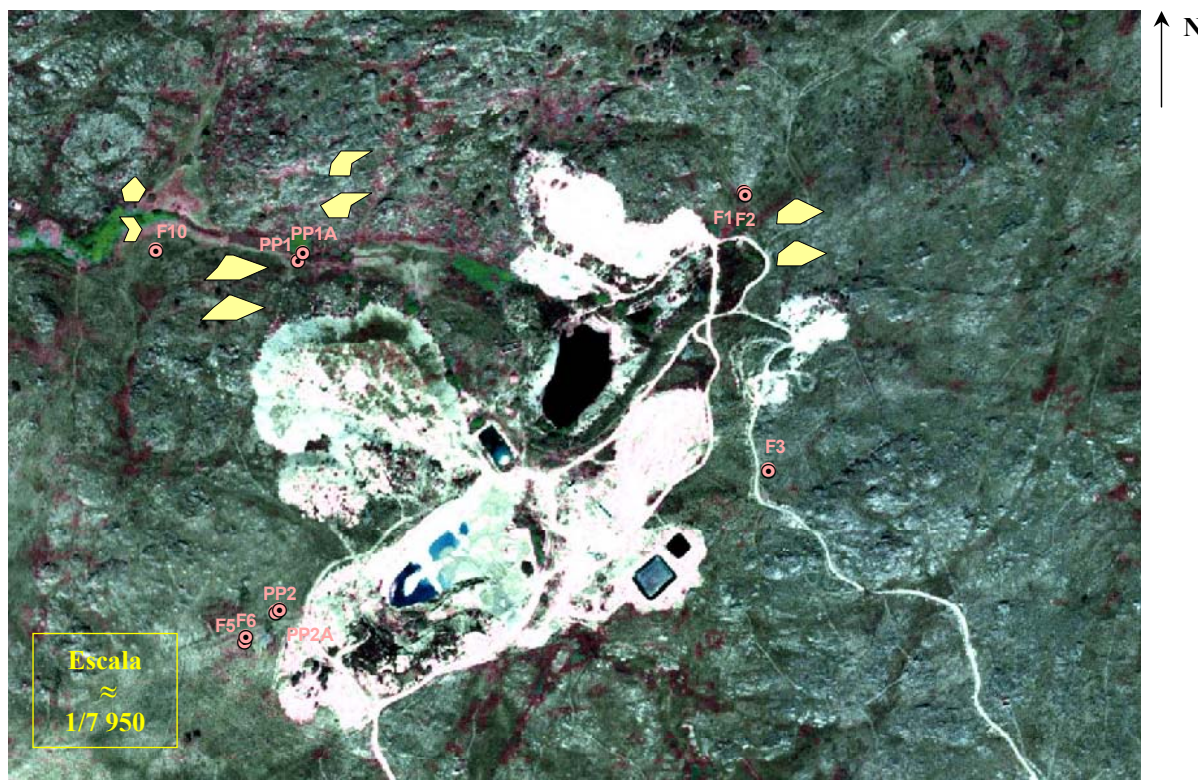


Figura 10-28 – Diagramas de Stiff relativos às amostras colhidas na campanha de monitorização de Setembro de 2009.

Comparando as Figuras 10-25 a 10-28 vê-se que, para os mesmos pontos, se verificam variações das fácies hidrogeoquímicas de umas campanhas para as outras. A explicação para este fenómeno poderá residir no facto de se ter verificado uma avaria na estação de tratamento de águas residuais da mina, o que, aliado às condições climáticas secas, em particular na estação quente, poderá ter contribuído para a alteração das fácies hidrogeoquímicas nalguns locais.

De facto, como aliás já foi referido, o Céu Aberto II esteve sem tratamento todo o Verão de 2008, tendo a estação de tratamento transbordado e enviado efluente directamente para a rede de drenagem. Colocou-se mesmo a possibilidade da água do Céu Aberto II ter estado a alimentar o furo PP1A, porquanto o nível da água parecia anormalmente elevado, ao contrário da tendência geral de níveis baixos que então se faziam sentir.

Na Tabela 10-1 apresentam-se sucintamente as fácies hidroquímicas presentes em cada ponto, ao longo do tempo em que ocorreram as quatro campanhas de amostragem.

Furo	Campanha de amostragem			
	28/03/2008	26/09/2008	26/03/2009	25/09/2009
F1-S	bicarbonatada sódica	-	-	-
F1-P	bicarbonatada cálcica	-	-	-
F2-S	bicarbonatada cálcica	bicarbonatada cálcica	bicarbonatada sódica	bicarbonatada sódica
F2-P	bicarbonatada cálcica	bicarbonatada cálcica	bicarbonatada sódica	bicarbonatada sódica
F10-S	bicarbonatada sódica	bicarbonatada cálcica	bicarbonatada cálcica	bicarbonatada cálcica
F10-P	bicarbonatada cálcica	bicarbonatada sódica	bicarbonatada cálcica	bicarbonatada magnésiana
PP1-S	bicarbonatada sódica	bicarbonatada sódica	bicarbonatada sódica	bicarbonatada sódica
PP1-P	bicarbonatada cálcica	bicarbonatada sódica	bicarbonatada sódica	bicarbonatada sódica
PP1A-S	sulfatada cálcica	sulfatada sódica	sulfatada sódica	sulfatada sódica
PP1A-P	sulfatada cálcica	sulfatada cálcica	sulfatada sódica	sulfatada cálcica

Tabela 10-1 – Tabela-resumo das fácies hidroquímicas presentes em cada ponto ao longo das campanhas de amostragem (S - amostra de superfície; P - amostra de profundidade).

A evolução ao longo do tempo das fácies hidroquímicas relativas a cada ponto de água demonstra que:

- as amostras superficiais colhidas no furo 2 apresentavam inicialmente uma fácies bicarbonatada cálcica, tendo a mesma, no decurso do 1º semestre hidrológico de 2008/2009, passado a bicarbonatada sódica, situação que se veio a manter ao longo de todas as campanhas de amostragem subsequentes; a alteração de fácies destas águas não parece, contudo, ser significativa, atendendo ao facto da fácies, quanto ao tipo catiónico, se situar entre o cálcico e o sódico, muito próximo da não existência de tipo catiónico dominante (a não existência de tipo catiónico dominante implica que as amostras possuam quantidades inferiores a 50 % de qualquer dos catiões);
- as amostras de profundidade colhidas no furo 2 apresentam um comportamento idêntico ao das amostras superficiais, pelo que se extraem as mesmas conclusões;
- a primeira amostra superficial colhida no furo 10 apresentava uma fácies bicarbonatada sódica, tendo a mesma, a partir do 2º semestre hidrológico de 2007/2008, passado a bicarbonatada cálcica; a alteração de fácies destas águas poderá relacionar-se com cálcio introduzido no sistema pelo tratamento efectuado, embora, uma vez mais, as fácies, quanto ao tipo catiónico, se situem entre o cálcico e o sódico, muito próximo da não existência de tipo dominante;
- a amostra de profundidade colhida no furo 10 no final do 1º semestre hidrológico de 2007/2008 apresentava uma fácies bicarbonatada cálcica, tendo a mesma, no 2º semestre hidrológico de 2007/2008, passado a bicarbonatada sódica; no 1º semestre hidrológico de

2008/2009, a fácies passa de novo a bicarbonatada cálcica, passando no 2º semestre hidrológico de 2008/2009 a bicarbonatada magnésiana; deve notar-se, no entanto, que a alteração de fácies destas águas não é muito vincada, o que sugere que as mesmas se encontram bastante próximas da não existência de tipo catiónico dominante, podendo reflectir apenas alterações pontuais das condições normais;

- as amostras superficiais colhidas no furo PP1 apresentam uma fácies bicarbonatada sódica, a qual se mantém constante ao longo de todas as campanhas de amostragem;

- as amostras de profundidade colhidas no furo PP1 apresentavam inicialmente uma fácies bicarbonatada cálcica, tendo a mesma, a partir do 2º semestre hidrológico de 2007/2008, passado a bicarbonatada sódica; esta situação, não deverá, no entanto, ser considerada anormal, atendendo a que as amostras se encontram bastante próximas da não existência de tipo catiónico dominante;

- as amostras de superfície colhidas no furo PP1A apresentavam inicialmente uma fácies sulfatada cálcica, tendo a mesma, a partir do 2º semestre hidrológico de 2007/2008, passado a sulfatada sódica; o tipo aniónico sulfatado aponta para uma contaminação por ião sulfato deste furo, situação que pode decorrer do facto de, no local, ter havido lugar a lixiviação ácida de minério pobre com vista à recolha adicional de urânio; o tipo catiónico cálcico de início, sódico depois, encontra-se muito próximo da zona de não existência de tipo catiónico dominante, pelo que carece de significado;

- as amostras de profundidade colhidas no furo PP1A apresentaram nos dois primeiros semestres do ano hidrológico 2007/2008 uma fácies sulfatada cálcica, tendo a mesma, no semestre seguinte (1º semestre hidrológico do ano 2008/2009) passado a sulfatada sódica; todavia, a partir do 2º semestre hidrológico de 2008/2009, a fácies recuperou as características de sulfatada cálcica; em relação ao tipo aniónico sulfatado, este, como vimos anteriormente, aponta para uma contaminação por ião sulfato deste furo; o tipo catiónico cálcico/sódico/cálcico reflecte de novo a não existência de tipo catiónico dominante.

10.4. Especificação do Urânio

Com vista à caracterização das espécies de urânio presentes nas águas subterrâneas da zona mineira, foi efectuada modelação hidrogeoquímica através do programa informático PHREEQC (*Parkhurst e Appelo, 1999*), que executa diversos cálculos hidrogeoquímicos de baixa temperatura.

Das diversas determinações efectuadas pelo programa, foram especialmente úteis as relacionadas com os Índices de Saturação, dados por (*Freeze & Cherry, 1979; Langmuir, 1997*):

$$IS = \frac{Q}{K_{eq}}$$

sendo

IS - Índice de Saturação;

Q - quociente da reacção;

K_{eq} - constante de equilíbrio;

e que permitem avaliar o sentido de progressão de determinada reacção química. Assim, se

$IS > 1$, a solução encontrar-se-á sobressaturada e a reacção tenderá a precipitar mineral;

$IS = 1$, a solução encontrar-se-á em equilíbrio;

$IS < 1$, a solução encontrar-se-á subsaturada e a reacção tenderá a dissolver mineral.

O Índice de Saturação pode também ser expresso em forma logarítmica, situação em que se a solução se encontrará em equilíbrio, ou saturação, relativamente a determinado mineral se $IS = 0$, em sobressaturação se $IS > 0$ e em subsaturação se $IS < 0$. Em termos práticos, considera-se em equilíbrio uma solução em que $-0.25 < IS < +0.25$. Os Índices de Saturação que se apresentam nas Tabelas 10-3 a 10-5 encontram-se expressos sob a forma logarítmica, pelo que uma solução em equilíbrio relativamente a determinado mineral, possuirá um $IS = 0$.

A especiação do urânio foi efectuada de acordo com o constante da Tabela 10-2.

Furo	Campanha de amostragem			
	28/03/2008	26/09/2008	26/03/2009	25/09/2009
F1-S	X	X	X	X
F1-P	X	X	X	X
F2-S	X	Sim	Sim	Sim
F2-P	X	Sim	Sim	Sim
F10-S	X	Sim	Sim	Sim
F10-P	X	Sim	Sim	Sim
PP1-S	X	Sim	Sim	X
PP1-P	X	X	X	X
PP1A-S	X	X	Sim	Sim
PP1A-P	X	Sim	Sim	Sim

Tabela 10-2 – Síntese dos pontos em que foi possível efectuar especiação.

Legenda: X – especiação não efectuada; Sim – efectuada especiação.

Na Tabela 10-2, as células assinaladas com X não foram objecto de especiação: ou por não ter sido possível amostrar os locais assinalados, ou pelo facto dos valores resultantes das análises não o permitirem, ou ainda pelo facto das amostras terem sido analisadas em laboratórios diferentes, através de métodos analíticos diferentes, apresentando limites de detecção igualmente diferentes.

10.4.1. Resultados obtidos

Apresentam-se seguidamente os resultados obtidos, decorrentes da interpretação dos índices de saturação determinados.

Relativamente à 2ª campanha, pode ver-se que:

- No Furo 2, colheita superficial, a solução encontra-se subsaturada em todos os minerais, à excepção do quartzo, em relação ao qual se encontra sobressaturada;
- No Furo 2, colheita em profundidade, a solução encontra-se sobressaturada em relação ao quartzo, cofinite ($USiO_4$), U_4O_9 na forma cristalina, e UO_2 , tanto no estado amorfo, como na forma cristalina de uraninite; em relação aos demais minerais, a solução encontra-se subsaturada;

2ª Campanha de Monitorização (26/09/2008)							
Fase	F2S-2	F2P-2	F10S-2	F10P-2	PP1S-2	PP1AP-2	Fórmula Química
(UO ₂) ₃ (PO ₄) ₂ ·4w			-29.88	-31.08			(UO ₂) ₃ (PO ₄) ₂ ·4H ₂ O
Anidrite	-3.4	-3.45	-3.89	-3.98	-3.93	-2.32	CaSO ₄
Autunite			-13.65	-14.74			Ca(UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂
B-UO ₂ (OH) ₂	-3.88	-5.35	-8.76	-9.72	-3.45	-3.81	UO ₂ (OH) ₂
Calcite	-1.66	-1.33	-3.74	-4.1	-1.88	-4.74	CaCO ₃
Cofinite	-1.64	5.87	-2.02	-1.77	1.44	5.4	USiO ₄
Fluorapatite			-6.43	-6.98			Ca ₅ (PO ₄) ₃ F
Fluorite	-1.64	-1.6	-1.98	-2.63	-1.2	-2.75	CaF ₂
Gumite	-8.87	-10.38	-13.74	-14.77	-8.45	-8.88	UO ₃
Gesso	-3.16	-3.21	-3.65	-3.74	-3.69	-2.07	CaSO ₄ ·2H ₂ O
H-Autunite			-16.96	-17.55			H ₂ (UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂
Halite	-8.09	-8.02	-8.53	-8.54	-7.69	-8.3	NaCl
Hidroxiapatite			-10.78	-11.3			Ca ₅ (PO ₄) ₃ OH
K-Autunite			-16.5	-16.26			K ₂ (UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂
Na-Autunite			-12.96	-13.78			Na ₂ (UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂
Na ₄ UO ₂ (CO ₃) ₃	-27.3	-28.26	-36.74	-37.86	-25.84	-33.03	Na ₄ UO ₂ (CO ₃) ₃
Ningioíte			-4.16	-3.07			CaU(PO ₄) ₂ ·2H ₂ O
Quartzo	1.27	1.23	1.24	1.25	1.06	1.23	SiO ₂
Rutherfordino	-3.56	-5.14	-8.24	-9.05	-3.03	-3.25	UO ₂ CO ₃
Saleíte			-14.82	-16.12			Mg(UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂
Schoepite	-3.71	-5.18	-8.59	-9.55	-3.28	-3.63	UO ₂ (OH) ₂ ·H ₂ O
U(HPO ₄) ₂ ·4H ₂ O			-10.15	-8.59			U(HPO ₄) ₂ ·4H ₂ O
U(OH) ₂ SO ₄	-20.63	-13.55	-19.19	-18.51	-17.55	-9.12	U(OH) ₂ SO ₄
U ₃ O ₈ (c)	-5.75	-1.14	-15.85	-17.56	-1.6	1.46	U ₃ O ₈
U ₄ O ₉ (c)	-5.72	15.49	-11.63	-11.9	4.59	15.6	U ₄ O ₉
UF ₄ (c)	-32.15	-25.53	-28.58	-28.85	-27.32	-20.97	UF ₄
UF ₄ ·2.5H ₂ O	-22.92	-16.22	-19.36	-19.52	-18.08	-11.59	UF ₄ ·2.5H ₂ O
UO ₂ (a)	-6.44	1.19	-6.8	-6.46	-3.15	0.78	UO ₂
UO ₂ HPO ₄ ·4H ₂ O			-8.18	-8.44			UO ₂ HPO ₄ ·4H ₂ O
UO ₃ (gamma)	-6.13	-7.63	-11.01	-12.01	-5.71	-6.11	UO ₃
Uraninite(c)	-1.82	5.74	-2.16	-1.93	1.47	5.26	UO ₂
Uranófono	-9.59	-12.07	-21.71	-23.96	-9.48	-12.62	Ca(UO ₂) ₂ (SiO ₃ OH) ₂

Legenda:

w- molécula de água (H₂O);
a – amorfo;
c – cristalino;
gamma (γ) – polimorfo de UO₃;

Tabela 10-3 – Resultados da especiação: índices de saturação da 2ª campanha de monitorização.

3ª Campanha de Monitorização (26/03/2009)								Fórmula Química
Fase	F2S-3	F2P-3	F10S-3	F10P-3	PP1S-3	PP1AS-3	PP1AP-3	
Anidrite	-3.15	-3.54	-3.84	-3.76	-4.25	-2.47	-2.45	CaSO ₄
B-UO ₂ (OH) ₂	-4.18	-4.41	-3.68	-4.1	-4.7	-3.14	-3.04	UO ₂ (OH) ₂
Calcite	-1.69	-1.43	-4.13	-3.41	-2.66	-3.53	-3.94	CaCO ₃
Cofinite	3.47	4.43	3.78	7.06	5.76	-1.13	-0.45	USiO ₄
Fluorite	-1.48	-1.35	-1.63	-1.62	-0.63	-2.46	-2.53	CaF ₂
Gumite	-9.3	-9.49	-8.82	-9.2	-9.84	-8.28	-8.14	UO ₃
Gesso	-2.9	-3.29	-3.59	-3.51	-3.99	-2.21	-2.2	CaSO ₄ ·2H ₂ O
Halite	-8.38	-8.33	-8.69	-8.74	-7.84	-8.24	-8.4	NaCl
Na ₄ UO ₂ (CO ₃) ₃	-27.69	-27.5	-32.32	-31.47	-28.08	-29.24	-30.43	Na ₄ UO ₂ (CO ₃) ₃
Quartzo	1.14	0.9	1.43	1.12	0.86	0.31	1.09	SiO ₂
Rutherfordino	-3.71	-4.11	-2.79	-3.16	-3.96	-2.55	-2.44	UO ₂ CO ₃
Schoepite	-4	-4.23	-3.49	-3.91	-4.51	-2.95	-2.86	UO ₂ (OH) ₂ ·H ₂ O
U(OH) ₂ SO ₄	-14.91	-14.53	-12.7	-9.73	-12.18	-16.01	-15.7	U(OH) ₂ SO ₄
U ₃ O ₈ (c)	-1.15	-0.39	-0.12	2.64	0.38	-2.83	-2.73	U ₃ O ₈
U ₄ O ₉ (c)	9.68	13.07	10.26	20.62	16.89	-0.56	-0.78	U ₄ O ₉
UF ₄ (c)	-26.75	-25.97	-21.36	-18.95	-20.05	-28.59	-27.85	UF ₄
UF ₄ ·2.5H ₂ O	-17.27	-16.57	-11.85	-9.52	-10.54	-19.08	-18.42	UF ₄ ·2.5H ₂ O
UO ₂ (a)	-0.97	0.16	-0.91	2.6	1.64	-4.7	-4.88	UO ₂
UO ₃ (gamma)	-6.51	-6.72	-6.02	-6.42	-7.04	-5.48	-5.36	UO ₃
Uraninite(c)	3.4	4.62	3.43	7.02	5.98	-0.36	-0.46	UO ₂
Uranófano	-10.25	-10.89	-11.47	-12.38	-13.04	-11.76	-10.53	Ca(UO ₂) ₂ (SiO ₃ OH) ₂

Legenda:

w- molécula de água (H₂O);
a – amorfo;
c – cristalino;
gamma (γ) – polimorfo de UO₃;

Tabela 10-4 – Resultados da especiação: índices de saturação da 3ª campanha de monitorização.

4ª Campanha de Monitorização (25/09/2009)							
Fase	F2S-4	F2P-4	F10S-4	F10P-4	PP1AS-4	PP1AP-4	Fórmula Química
(UO ₂) ₃ (PO ₄) ₂ :4w					-24.99		(UO ₂) ₃ (PO ₄) ₂ :4H ₂ O
Anidrite	-3.23	-3.36	-3.63	-4.01	-2.29	-2.09	CaSO ₄
Autunite					-11.61		Ca(UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂
B-UO ₂ (OH) ₂	-5.05	-8.55	-4.35	-4.77	-6.58	-3.11	UO ₂ (OH) ₂
Calcite	-2.17	-1.54	-4.59	-4.39	-3.88	-3.42	CaCO ₃
Cofinite	5.06	5.45	3.45	5.36	-1.85	1.57	USiO ₄
Fluorapatite					-10.84		Ca ₅ (PO ₄) ₃ F
Fluorite	-1.16	-1.07	-1.32	-2.08	-2.71	-4.2	CaF ₂
Gumite	-10.08	-13.62	-9.34	-9.83	-11.65	-8.17	UO ₃
Gesso	-2.98	-3.11	-3.39	-3.76	-2.04	-1.84	CaSO ₄ :2H ₂ O
H-Autunite					-14.73		H ₂ (UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂
Halite	-8.11	-8.04	-8.34	-8.49	-8.1	-8.24	NaCl
Hidroxiapatite					-14.98		Ca ₅ (PO ₄) ₃ OH
K-Autunite					-12.49		K ₂ (UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂
Na-Autunite					-10.32		Na ₂ (UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂
Na ₄ UO ₂ (CO ₃) ₃	-29.26	-31.4	-33.47	-32.7	-33.76	-29.79	Na ₄ UO ₂ (CO ₃) ₃
Ningioite					-5.82		CaU(PO ₄) ₂ :2H ₂ O
Quartzo	0.84	0.97	0.85	0.93	0.77	0.8	SiO ₂
Rutherfordino	-4.43	-7.96	-3.45	-3.78	-5.99	-2.43	UO ₂ CO ₃
Saleíte					-12.48		Mg(UO ₂) ₂ (PO ₄) ₂
Schoepite	-4.88	-8.37	-4.19	-4.59	-6.4	-2.94	UO ₂ (OH) ₂ :H ₂ O
U(HPO ₄) ₂ :4H ₂ O					-11.65		U(HPO ₄) ₂ :4H ₂ O
U(OH) ₂ SO ₄	-12.49	-13.03	-11.84	-10.47	-16.7	-13.47	U(OH) ₂ SO ₄
U ₃ O ₈ (c)	-0.98	-7.72	-1.19	-0.21	-10.87	-0.55	U ₃ O ₈
U ₄ O ₉ (c)	14.5	11.77	10.34	15.41	-7.53	6.1	U ₄ O ₉
UF ₄ (c)	-22.55	-23.62	-18.93	-19.13	-29.3	-29.57	UF ₄
UF ₄ :2.5H ₂ O	-13.25	-14.25	-9.71	-9.77	-19.92	-20.22	UF ₄ :2.5H ₂ O
UO ₂ (a)	0.75	1.08	-0.94	1.01	-6.01	-2.64	UO ₂
UO ₂ HPO ₄ :4H ₂ O					-7.02		UO ₂ HPO ₄ :4H ₂ O
UO ₃ (gamma)	-7.33	-10.85	-6.61	-7.06	-8.88	-5.41	UO ₃
Uraninite(c)	5.31	5.56	3.7	5.52	-1.53	1.86	UO ₂
Uranófono	-13.52	-19.47	-14.92	-15.26	-18.27	-10.94	Ca(UO ₂) ₂ (SiO ₃ OH) ₂

Legenda:

w- molécula de água (H₂O);
a – amorfo;
c – cristalino;
gamma (γ) – polimorfo de UO₃;

Tabela 10-5 – Resultados da especiação: índices de saturação da 4ª campanha de monitorização.

- No Furo 10, colheita superficial, a solução encontra-se subsaturada em todos os minerais, à excepção do quartzo, em relação ao qual se encontra sobressaturada;
- No Furo 10, colheita em profundidade, passa-se idêntica situação, encontrando-se a solução subsaturada em todos os minerais, à excepção do quartzo, em relação ao qual se encontra sobressaturada;
- No Furo PP1, colheita superficial, a solução encontra-se sobressaturada em relação ao quartzo, cofinite (USiO_4), U_4O_9 na forma cristalina, e uraninite (UO_2) na forma cristalina; em relação aos demais minerais, a solução encontra-se subsaturada;
- No Furo PP1A, colheita em profundidade, a solução encontra-se sobressaturada em relação ao quartzo, cofinite (USiO_4), U_3O_8 na forma cristalina, U_4O_9 na forma cristalina, e UO_2 , tanto no estado amorfo, como sob a forma cristalina de uraninite; em relação aos demais minerais, a solução encontra-se subsaturada.

Quanto à 3ª campanha, pode ver-se que:

- No Furo 2, colheita superficial, a solução encontra-se sobressaturada em relação ao quartzo, cofinite (USiO_4), U_4O_9 na forma cristalina e uraninite (UO_2) na forma cristalina; em relação aos demais minerais, a solução encontra-se subsaturada;
- No Furo 2, colheita em profundidade, a solução encontra-se sobressaturada em relação ao quartzo, cofinite (USiO_4), U_4O_9 na forma cristalina, e uraninite (UO_2) na forma cristalina; a solução apresenta-se saturada quanto ao UO_2 no estado amorfo, relativamente ao qual se encontra praticamente em equilíbrio; em relação aos demais minerais, a solução encontra-se subsaturada;
- No Furo 10, colheita superficial, a solução encontra-se sobressaturada em relação ao quartzo, cofinite (USiO_4), U_4O_9 na forma cristalina, e uraninite (UO_2) na forma cristalina; a solução apresenta-se saturada quanto ao U_3O_8 na forma cristalina, relativamente ao qual se encontra praticamente em equilíbrio; em relação aos demais minerais, a solução encontra-se subsaturada;
- No Furo 10, colheita em profundidade, a solução encontra-se sobressaturada em relação ao quartzo, cofinite (USiO_4), U_3O_8 na forma cristalina, U_4O_9 na forma cristalina, e UO_2 , tanto no estado amorfo, como sob a forma cristalina de uraninite; em relação aos demais minerais, a solução encontra-se subsaturada;
- No Furo PP1, colheita superficial, a solução encontra-se sobressaturada em relação ao quartzo, cofinite (USiO_4), U_3O_8 na forma cristalina, U_4O_9 na forma cristalina, e UO_2 , tanto no estado amorfo, como sob a forma cristalina de uraninite; em relação aos demais minerais, a solução encontra-se subsaturada;
- No Furo PP1A, colheita superficial, a solução encontra-se subsaturada em todos os minerais, à excepção do quartzo, em relação ao qual se encontra sobressaturada;

- No Furo PP1A, colheita em profundidade, verifica-se situação idêntica, encontrando-se a solução subsaturada em todos os minerais, à excepção do quartzo, em relação ao qual se encontra sobressaturada;

Em relação à 4ª campanha, pode ver-se que:

- No Furo 2, colheita superficial, a solução encontra-se sobressaturada em relação ao quartzo, cofinite (USiO_4), U_4O_9 na forma cristalina e UO_2 , tanto no estado amorfo, como sob a forma cristalina de uraninite; em relação aos demais minerais, a solução encontra-se subsaturada;
- No Furo 2, colheita em profundidade, verifica-se situação idêntica, encontrando-se a solução sobressaturada em relação ao quartzo, cofinite (USiO_4), U_4O_9 na forma cristalina e UO_2 , tanto no estado amorfo, como sob a forma cristalina de uraninite; em relação aos demais minerais, a solução encontra-se subsaturada;
- No Furo 10, colheita superficial, a solução encontra-se sobressaturada em relação ao quartzo, cofinite (USiO_4), U_4O_9 na forma cristalina, e uraninite (UO_2) na forma cristalina; em relação aos demais minerais, a solução encontra-se subsaturada;
- No Furo 10, colheita em profundidade, a solução encontra-se sobressaturada em relação ao quartzo, cofinite (USiO_4), U_4O_9 na forma cristalina, e UO_2 , tanto no estado amorfo, como sob a forma cristalina de uraninite; a solução apresenta-se saturada quanto ao U_3O_8 na forma cristalina, relativamente ao qual se encontra praticamente em equilíbrio; em relação aos demais minerais, a solução encontra-se subsaturada;
- No Furo PP1A, colheita superficial, a solução encontra-se subsaturada em todos os minerais, à excepção do quartzo, em relação ao qual se encontra sobressaturada;
- No Furo PP1A, colheita em profundidade, a solução encontra-se sobressaturada em relação ao quartzo, cofinite (USiO_4), U_4O_9 na forma cristalina, e uraninite (UO_2) na forma cristalina; em relação aos demais minerais, a solução encontra-se subsaturada;

Como pode facilmente verificar-se, através das quantidades constantes dos resultados das análises (Tabelas AI-6 a AI-15), as diversas espécies de urânio presentes na água subterrânea, obtidas após especiação, são muito reduzidas (Tabela 10-6).

De acordo com o processo de especiação, foi no Furo 10, na colheita efectuada em profundidade na 3ª campanha de monitorização (Março de 2009), que ocorreu a espécie em maior quantidade. Trata-se de $\text{U}(\text{OH})_4$ - o U encontra-se no estado de oxidação 4, U (4) – que ocorre com a concentração molal de $3.703 \times 10^{-7} \text{ mol.Kg}^{-1}$.

A Tabela 10-6 apresenta uma súmula das amostragens e espécies de urânio que ocorrem em maior concentração molal nos locais amostrados, no decurso das diversas campanhas de monitorização.

Local e colheita (S ou P)	Data da campanha	Estado de oxidação	Concentração total (molalidade)	Espécie química	Concentração da espécie (molalidade)
F2-S	Set 2008	U (6)	2.400×10^{-8}	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$	1.920×10^{-8}
F2-P	Set 2008	U (4)	2.121×10^{-8}	$\text{U}(\text{OH})_4$	2.119×10^{-8}
F10-P	Set 2008	U (6)	1.093×10^{-7}	$\text{UO}_2(\text{HPO}_4)_2^{2-}$	1.093×10^{-7}
F10-P	Mar 2009	U (5)	2.793×10^{-7}	UO_2^+	2.793×10^{-7}
F10-P	Mar 2009	U (4)	3.762×10^{-7}	$\text{U}(\text{OH})_4$	3.703×10^{-7}
PP1-S	Set 2008	U (6)	6.714×10^{-8}	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$	5.116×10^{-8}
PP1-S	Mar 2009	U (5)	1.157×10^{-8}	UO_2^+	1.157×10^{-8}
PP1-S	Mar 2009	U (4)	3.157×10^{-8}	$\text{U}(\text{OH})_4$	3.143×10^{-8}
PP1A-P	Mar 2009	U (6)	1.007×10^{-7}	UO_2CO_3	5.534×10^{-8}
PP1A-P	Mar 2009	U (6)	1.007×10^{-7}	UO_2F^+	1.629×10^{-8}
PP1A-P	Mar 2009	U (6)	1.007×10^{-7}	UO_2^{2+}	1.149×10^{-8}
PP1A-P	Set 2008	U (5)	1.438×10^{-7}	UO_2^+	1.438×10^{-7}

Tabela 10-6 – Amostragens e espécies de urânio que ocorrem em maior concentração (molal).

11. Conclusões

O trabalho visa proceder à caracterização da antiga área mineira de Castelejo, local em que operou uma antiga exploração de urânio hoje desactivada, actualmente objecto de recuperação ambiental por parte da Empresa de Desenvolvimento Mineiro (EDM), empresa encarregue de gerir os passivos ambientais decorrentes da exploração mineira em Portugal.

A exploração, que decorreu entre 1979 e 1990 em duas cortas a céu aberto, permitiu produzir cerca de 132 toneladas de minério (U_3O_8). Mais tarde, em 1992, uma das cortas foi utilizada para lixiviação ácida de minério pobre, proveniente tanto desta mina, como de outras situadas nas proximidades, o que permitiu produzir ainda cerca de 22,5 toneladas de U_3O_8 .

Os objectivos pretendidos com a realização do trabalho têm em vista a caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica da envolvente da área mineira, efectuada através do estabelecimento de um modelo de escoamento e transporte, bem como de um modelo hidrogeoquímico, com base na informação recolhida. Pretendia-se igualmente avaliar a possível contaminação da água subterrânea relacionada com as actividades mineiras, bem como a sua eventual dispersão.

Era conhecida a situação em termos de tectónica regional, que se sabia complexa, encontrando-se associada, tanto a diversos episódios de fracturação tardi-Hercínicos, como à tectónica Alpina, tendo sido consideradas importantes para este estudo, pela sua proximidade com a zona de Castelejo, as falhas activas Seia-Lousã, Manteigas-Vilariça-Bragança e Penacova-Régua-Verín.

No entanto, a fim de conhecer a situação tectónica local, foram efectuadas duas campanhas de prospecção geofísica, com vista ao reconhecimento e caracterização da fracturação, no sentido de proceder à determinação de vias de escoamento preferencial da água, tendo os resultados obtidos sido cruzados e complementados com análise de lineamentos e informação retirada da bibliografia.

Concluiu-se que a direcção da tensão compressiva máxima, σ_1 , situada de NNW-SSE a NW-SE, na qual se desenvolvem fracturas de extensão, deverá ser aquela em que a água subterrânea circula com mais facilidade, uma vez que as maiores aberturas das fracturas proporcionam um melhor escoamento.

Todos os perfis efectuados através da prospecção *Radio Magnetotelluric-Resistivity (RMT-R)* revelaram uma situação singular, que prendeu a nossa atenção – os valores de resistividade diminuía em profundidade. Tal tanto poderia dever-se a causas naturais (camadas mais alteradas), como ser indicativo de uma situação de contaminação profunda com drenagem ácida (aumento da mineralização). Tal apenas veio a esclarecer-se após as diversas campanhas de análises hidrogeoquímicas efectuadas.

Através da implementação de uma técnica mista geofísico-geoestatística, os resultados da prospecção geofísica foram convertidos numa variável dicotómica indicatriz, determinando os valores de 1 e 0, consoante fosse, ou não, estabelecida a situação de pertença a uma falha ou fractura (“corpo”) localizada no campo amostral. Em seguida procedeu-se à estimação por krigagem da proporção e morfologia das fracturas constantes do campo de amostragem.

Desta forma, com base no estabelecimento de uma correspondência entre os resultados da prospecção geofísica e a identificação das fracturas presentes no campo de trabalho, foi possível proceder à estimação da morfologia da fracturação.

Os dados das análises de águas, resultantes da monitorização química a furos e poços efectuada pela Empresa Nacional de Urânio (ENU) no perímetro da área mineira, foram

tratados através de análise multivariada, aplicada a dois períodos distintos, tendo resultado na caracterização hidrogeológica preliminar da área mineira. Desta forma, o tratamento dos dados relativos às análises químicas das águas permitiu discriminá-las em grupos de variáveis, tendo em vista a compreensão das relações existentes entre elas.

Assim, verifica-se que estes grupos de variáveis se associam a determinados locais, em conformidade com os processos que aí se desenvolveram, sejam eles naturais, como a ocorrência de determinados minerais ou a meteorização de outros, ou artificiais, como os processos de tratamento de minério e efluentes.

No sentido de uma melhor proceder à caracterização hidrogeológica da área estudada, foi efectuado um ensaio de traçagem, utilizando o método do gradiente natural, nas imediações da área mineira. O ensaio foi efectuado no principal eixo de escoamento local, situado na caixa de falha ocupada pelo Vale de Castelejo e visava recolher dados que permitissem obter valores para alguns parâmetros hidráulicos, como sejam o coeficiente de dispersão hidrodinâmica e os coeficientes de dispersividade longitudinal e transversal.

Embora a monitorização em contínuo aos fluorímetros então instalados tenha tido a duração aproximada de 3 meses, não foi possível detectar qualquer vestígio do traçador utilizado em qualquer dos locais monitorizados.

Algumas razões que podem ser avançadas relativamente ao fracasso do ensaio de traçagem relacionam-se com a distância existente entre os furos de injeção e monitorização, com o facto do ensaio ter sido implementado com base no método do gradiente natural - portanto, sem recurso a bombagem - e também com as características litológicas e a heterogeneidade local dos terrenos ensaiados, que decisivamente condicionam a sua permeabilidade.

A dificuldade de escoamento da água no furo de injeção do traçador, viria a verificar-se pelo facto de, a partir da data de injeção, não ter sido possível proceder a colheitas de amostras naquele furo, em virtude das suas águas se encontrarem impregnadas de uranina, o traçador utilizado no ensaio.

A par da realização do ensaio de traçagem, procedeu-se ao registo automático do nível da água e sua recuperação, a intervalos de tempo pré-estabelecidos, no interior do furo de injeção. O automatismo deste tipo de medição, aplicado à subtracção ou injeção instantânea de um volume conhecido de água no furo, permite que os resultados sejam interpretados como “*slug-tests*”. A partir destes, obtiveram-se valores para a condutividade hidráulica, $K \approx 2,6 \times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$, válidos para as imediações do furo de injeção.

Atendendo ainda a que os fluorímetros instalados nos furos de monitorização do ensaio mediam, entre outros parâmetros, também a temperatura da água, sendo conhecidas as suas profundidades de instalação, os resultados obtidos permitiram estabelecer a existência de dois níveis aquíferos na zona estudada. De acordo com a interpretação de diversos “logs” de sondagem, a zona limite entre os dois aquíferos considera-se situada aproximadamente nos 28 m de profundidade. Também as leituras dos níveis piezométricos dos furos monitorizados corroboram a existência de dois níveis aquíferos, um aquífero superior – livre -, e um aquífero inferior - confinado ou localmente semi-confinado -, exibindo artesianismo.

Foi efectuado um tratamento conjunto dos dados piezométricos históricos e actuais, tendo-lhes sido aplicada uma ferramenta matemática de atenuação (*LOWESS*), no sentido de determinar eventuais tendências verificadas em cada um dos pontos de água considerados. Embora com algumas excepções, a generalidade das tendências verificadas, tanto nos

piezómetros como nos poços, aponta no sentido de uma, ainda que ligeira, recuperação dos níveis.

A compilação dos diversos dados obtidos permitiu proceder a uma etapa de modelação numérica do escoamento e transporte da água subterrânea existente sob a área mineira.

O modelo conceptual aplicado à zona situada no Vale do Castelejo, aponta para que o aquífero livre superficial, instalado na caixa de falha ali existente, apresente nesta zona uma espessura próxima dos 28 m. A geometria do aquífero livre superficial na zona em que este apresenta a sua maior espessura acompanha, assim, a topografia do Vale do Castelejo.

Relativamente às colinas circundantes, a espessura estimada aponta para valores bastante mais modestos, da ordem dos 3 m abaixo da superfície.

Por esta razão, foi decidido proceder à modelação de uma única camada mista, correspondente a um aquífero superficial livre (correspondente ao instalado nos granitos meteorizados do Vale do Castelejo) ou semi-confinado (correspondente ao localizado nas fracturas do granito), com uma espessura variável, definindo-se a superfície a partir das cotas do terreno e localizando-se a base na altitude de 330 m. Simultaneamente, foi simulada uma zona um pouco mais extensa da área mineira, a fim de obter uma perspectiva alargada da situação hidrogeológica existente.

Os dados recolhidos no decurso da amostragem estiveram na base do processo de calibração, que permitiu determinar a direcção do escoamento em toda a área modelada, e em particular nas imediações da área mineira. A modelação foi realizada em regime de equilíbrio durante um período de 20 anos, para o modelo de escoamento e para o modelo de rastreio de partículas.

O fluxo segue aproximadamente a tendência geral da topografia, sendo que a principal direcção de escoamento, a partir da antiga área mineira, se dirige para NW, no sentido do Vale de Castelejo.

Embora o contaminante em apreço seja o urânio, isto é, um metal não conservativo, susceptível de sofrer adsorção na superfície de outras substâncias e também degradação radioactiva, o rastreio de partículas foi efectuado para um contaminante conservativo, não adsorvente ou reactivo, uma vez que seria difícil reproduzir as condições de campo, em que a propagação da contaminação parece ter-se processado essencialmente através da fracturação existente nos granitos da área mineira e não em meio poroso, conforme simulado pelo modelo. A que acresce o facto de, ocorrendo a injeção do urânio de forma contínua, serem desconhecidas, tanto as concentrações iniciais, como as ainda presentes, nos poços de lixiviação do Céu Aberto II, tornando pouco rigorosas eventuais estimativas das quantidades de urânio ainda mobilizáveis.

Foi calculada a tendência do trajecto a efectuar pelas partículas ao longo de intervalos de tempo sucessivamente crescentes, para uma simulação em regime de equilíbrio. A trajectória das partículas reflecte a situação piezométrica, dirigindo-se para o Vale de Castelejo.

Os resultados das diversas análises químicas realizadas no decurso das quatro campanhas de amostragem efectuadas permitiram obter importantes conclusões. Assim, da prospecção geofísica realizada ao longo do vale de falha do Castelejo verificou-se que, em todos os perfis efectuados, os valores de resistividade diminuíam em profundidade.

As explicações para tal facto poderiam dever-se a causas naturais (camadas mais alteradas em profundidade, atendendo ao facto de nos encontrarmos sobre um vale de falha) ou a uma eventual situação de contaminação profunda com Drenagem Ácida de Mina, provocando um aumento da mineralização.

Atendendo à oposição verificada entre resistividade e condutividade, se os valores de resistividade diminuem em profundidade, então os valores de condutividade devem aumentar. Analisando a evolução dos valores de condutividade nos diversos furos, verificamos que em F2, PP1 e PP1A esta situação não acontece, isto é, não existe um padrão definido para a evolução da condutividade da superfície para a profundidade. Por outro lado, em F10, em todas as amostragens se verifica um aumento, ainda que pouco pronunciado, da condutividade da superfície para a profundidade.

Desta forma, julgamos que a inconstância das tendências verificadas nos furos F2, PP1 e PP1A deve atribuir-se a uma alteração das condições físico-químicas do sistema, em resultado de uma situação de contaminação intermitente ou sazonal, de acordo com as condições existentes no subsolo das imediações da mina em cada momento (quantidade de contaminantes presentes, concentração dos mesmos, condições atmosféricas). Quanto ao aumento da condutividade da superfície para a profundidade verificado em F10, o mesmo permite apoiar a hipótese de existência de uma contaminação de fundo naquele ponto.

A evolução ao longo do tempo das fácies hidrogeoquímicas relativas a cada ponto de água demonstra que as amostras referentes aos furos F02, F10, PP1 exibem fácies que oscilam entre a bicarbonatada sódica e a bicarbonatada cálcica, perfeitamente integradas nas litologias locais; relativamente a PP1A, este furo apresenta fácies sulfatadas cálcicas ou sódicas, o que parece revelar a existência de uma contaminação local por sulfatos. Esta situação pode encontrar-se ligada à lixiviação com utilização de ácido sulfúrico efectuada no Céu Aberto II, podendo a sua influência fazer-se ainda sentir neste ponto devido à intercomunicabilidade entre a fractura sobre a qual se situa o furo PP1 e as que cruzam o Céu Aberto II.

Com base nos resultados das análises efectuadas procedeu-se à especiação do urânio presente na água subterrânea. Verifica-se, contudo, que as diversas espécies de urânio presentes na água subterrânea, obtidas após especiação, são muito reduzidas. De acordo com o processo de especiação, foi no Furo 10 que ocorreu a espécie em maior quantidade. Trata-se de $U(OH)_4$, encontrando-se o U no estado de oxidação 4 [U (4)] e ocorrendo com a concentração molal de $3.703 \times 10^{-7} \text{ mol.Kg}^{-1}$.

Os resultados das análises realizadas nas 4 campanhas de amostragem efectuadas enquadram-se nos parâmetros estabelecidos através do Anexo I (Qualidade das águas doces superficiais destinadas à produção de água para consumo humano) do Dec.-Lei 236/98, não demonstrando qualquer desconformidade em relação aos valores máximos estabelecidos para os parâmetros verificados.

Relativamente ao urânio, atendendo à ausência de legislação nacional aplicável, entendemos socorrer-nos da norma US EPA CFR 40 “*Protection of Environment – Part 141*”. Esta norma estabelece o valor de 30 $\mu\text{g/l}$, relativamente aos padrões de água para consumo humano (*drinking water standards*). Verifica-se que pelo menos uma, das quatro campanhas analíticas efectuadas em cada um dos furos, F10, PP1 e PP1A, ultrapassou o valor definido pela norma, ainda que tal não pareça especialmente preocupante, atendendo à ausência de população nas imediações da área mineira.

12. Bibliografia

ARHCentro, Administração da Região Hidrográfica do Centro, IP (1999). Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Mondego. Anexo 10 – Qualidade das águas subterrâneas. Documento técnico. 12 pp.

Anderson, E.(1951). The dynamic of faulting. Oliver and Boyd, Edinburgh, United Kingdom, 206 pp.

Cabral, J. (1995). Neotectónica em Portugal Continental. *Memórias do Instituto Geológico e Mineiro*, Lisboa, 31, 266 pp.

Cabral, J., Ribeiro, A. (1988). Carta Neotectónica de Portugal Continental, escala 1:1000000 e nota explicativa. Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências de Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, Gabinete de Protecção e Segurança Nuclear, *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 10 pp.

Cameron, J. (1960). The ore controls of some uranium vein deposits in Portugal. Junta de Energia Nuclear, Technical papers 26, 63 pp.

Cerveira, A. (1951). Sobre a metalogenia do urânio em Portugal. *Boletim da Sociedade Geológica Portuguesa*, 8(3), pp.141-182

Cleveland, W. (1979). Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 74, nº 368, pp. 829-836.

Cleveland, W. & Loader, C. (1996). Smoothing by local regression: Principles and methods. In *W. Härdle, M. G. Schimek (editors) Statistical Theory and Computational Aspects of Smoothing*, Springer, New York, pp. 10-49.

CNA-Comissão Nacional do Ambiente (1978). Atlas do Ambiente de Portugal, III-1 Carta dos Solos. Instituto Hidrográfico, 1978.

CVRM-Centro de Geosistemas do IST (1989-2002). Programa ANDAD (versão 7.10) e Manual do utilizador, IST, 70 pp.

Dias, J.M., Andrade, A.S. (1970). Uranium deposits in Portugal. *Uranium Exploration Geology*, I.A.E.A., Vienna, pp. 129-142

Dill, A., Müller, I., Costa, A., Monteiro, J. (1998). Importância do uso de métodos geofísicos electromagnéticos Very Low Frequency Electromagnetics (VLF-EM) e radio Magnetotelluric-Resistivity (RMT-R) no estudo de aquíferos cársicos do Alentejo e do Algarve. 4º Congresso da Água, A.P.R.H., Lisboa, 10 pp.

Erdas (2001). Programa ER Mapper 6, v. 1.1, Norcross, USA.

Faria, F.L. (1966). Gites d'uranium portugais dans les formations métasédimentaires. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, L, pp. 9-50

Farnham, I., Singh, A., Stetzenbach, K., Johannesson, K. (2002). Treatment of nondetects in multivariate analysis of groundwater geochemistry data. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* **60** (1), pp. 265-281.

Fernandes, A., Rudolph, D. (2001). The influence of Cenozoic tectonics on the groundwater-production capacity of fractured zones: a case study in Sao Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal* **9**, pp. 151-167.

Ferreira, M.P. (1971). Jazigos uraníferos portugueses, jazigos de Au-Ag-sulfuretos do norte de Portugal. I Congresso Hispano-Luso-Americano de Geologia Económica, Livro-Guia da Excursão nº 5, *Direcção-Geral de Minas e Serviços Geológicos*, Lisboa, 81 pp.

Fetter, C. (1994). Applied Hydrogeology. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 691 pp.

Fetter, C. (1993). Contaminant Hydrogeology. MacMillan, Inc., New York, 458 pp.

Freeze, R., Cherry, J. (1979). Groundwater. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 604 pp.

Helsel, D. (1987). Advantages of nonparametric procedures for analysis of water quality data. *Hydrological Sciences Journal* **32** (2), pp. 179-190.

Helsel, D., Cohn, T. (1988). Estimation of Descriptive Statistics for Multiple Censored Water Quality Data. *Water Resources Research* **24** (12), pp. 1997-2004.

Helsel, D. (2006). Fabricating data: how substituting values for nondetects can ruin results, and what can be done about it. *Chemosphere* **65**, pp. 2434-2439.

Helsel, D. & Hirsch, R. (1992). Statistical Methods in Water Resources. Chapter A3, Book 4, Hydrologic Analysis and Interpretation, Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, 510 pp.

<http://www.fao.org/nr/land/soils/key-to-the-fao-soil-units-1974/it/>

<http://www.meteo.pt/pt/areaeducativa/otempo.eoclima/clima.pt/index.html>

Isaaks, E., Srivastava, R. (1989). Applied Geostatistics. Oxford University Press, 561 pp.

Kearey, P. & Brooks, M. (1991). An Introduction to Geophysical Exploration. Blackwell Science Publications, 282 pp.

Krupka, K., Serne, R., Kaplan, D. (2004). Geochemical data package for the 2005 Hanford integrated disposal facility performance assessment. Prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC06-76RL01830, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, 145 pp.

Langmuir, D. (1997). Aqueous Environmental Geochemistry. Prentice Hall, 600 pp.

Lottermoser, B. (2003). Mine wastes, characterization, treatment and environmental impacts. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 277 pp.

- McDonald, M., Harbaugh, W. (1988). A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. *Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 6, Chapter A1, U.S. Geological Survey, 588 pp.
- Milsom, J. (1989). *Field geophysics*. Open University Press, Milton Keynes and Halsted Press, John Wiley & Sons, New York, 250 pp.
- Müller, I., Dill, A. (1996). Advances on electromagnetic prospecting to survey shallow aquifers and contaminated sites. *International Congress on Environment and Climate*, Rome.
- Neiva, J.M.C. (1944). Jazigos portugueses de cassiterite e volframite. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, **XXV**, 251 pp.
- Neiva, J.M.C. (1995). Jazigos portugueses de minérios de urânio. *Memórias* **4**, IV Congresso Nacional de Geologia, Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, pp. 575-579
- Nunes, A. (1983). A geologia económica e a indústria mineira através dos tempos. *Geonovas* **5**, pp. 67-114
- Oliveira, V., Ribeiro, L. (2003). Análise de Dados Aplicada à Caracterização Hidrogeológica de Áreas Mineiras Abandonadas: A Mina de Urânio do Castelejo. *Seminário Sobre Águas Subterrâneas*, A.P.R.H., L.N.E.C., Lisboa, 11 pp.
- Pereira, A., Neves, L., Abrantes, L. (2003). O gás radão em águas subterrâneas: o caso da região de Oliveira do Hospital (Portugal Central). *IV Congresso Ibérico de Geoquímica e XIII Semana de Geoquímica*, Coimbra, pp. 304-306
- Pereira, H. (1990). *Análise de Dados Geológico-Mineiros. Aplicações e Estudo Metodológico*. Instituto Superior Técnico, 263 pp.
- Parkhurst, D., and Appelo, C. (1999). PHREEQC 2 and User's Guide to PHREEQC (Version 2) - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259, 312 p.
- Pilar, L. (1969). Contribuição para o conhecimento dos minerais de urânio de Portugal metropolitano. *Junta de Energia Nuclear*, 50 pp.
- Ponte, M. (1992). Estudo geológico-estrutural e determinação da circulação hidrológica, na área de influência do jazigo do Castelejo. *ENU, Relatório interno*, 13 pp.
- Ribeiro, A., Antunes, M.T., Ferreira, M.P., Rocha, R.B., Soares, A.F., Zbyszewski, G., Moitinho de Almeida, F., Carvalho, D. e Monteiro, J.H. (1979). Introduction à la géologie générale du Portugal. *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa 114 pp.
- Singh, A., Nocerino, J. (2001). Robust estimation of mean and variance using environmental data sets with below detection limit observations. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* **60** (1), pp. 69-86.

Schnegg P-A (2002). An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement. Paper presented at the XXXII IAH & VI ALHSUD Congress “Groundwater and Human Development”, Mar del Plata, Argentina.

Soares, A. (1989). Morfologia geoestatística de recursos minerais. Tese de Doutoramento. IST, 139 pp.

Teixeira, C. (1966). A evolução do território português no decurso dos tempos geológicos. *Palestra Rev. Ped. Cult.*, Vol. **28**, Lisboa, pp. 111-157

Teixeira, C., Carvalho, B., Santos, P., Peres, M., Barros, R. (1967). Carta geológica de Portugal à escala 1:50.000, Folha 17-D (Gouveia) e notícia explicativa. *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 28 pp.

Thadeu, D. (1965). Carta mineira de Portugal na escala 1:500.000, notícia explicativa. *Serviços Geológicos de Portugal*, 46 pp.

Thibault, D., Sheppard, M., Smith, P. (1990). A Critical Compilation and Review of Default Soil Solid/Liquid Partition Coefficients, K_d , for Use in Environmental Assessments. AECL-10125, Whiteshell Nuclear Research Establishment, Atomic Energy of Canada Limited, Pinawa, Canada.

Thierrin, J., Müller, I. (1988). La méthode VLF-Résistivité multifréquence, un exemple d’exploration hydrogéologique dans un synclinal crétacé à la Brévine (Jura neuchâtelois). *Annales Scientifiques de l’Université de Besançon*, Mémoire Hors de Série, n° **6**, Quatrième Colloque d’Hydrogéologie en Pays Calcaire, Besançon, France, pp. 17-25

Turberg, P., Müller, I. (1992). La méthode inductive VLF-EM pour la prospection hydrogéologique en continu du milieu fissure. *Annales Scientifiques de l’Université de Besançon*, Mémoire Hors de Série, n° **11**, Cinquième Colloque d’Hydrogéologie en Pays Calcaire et en Milieu Fissuré, Neuchâtel, Suisse, pp. 207-214

United States Environmental Protection Agency (2004). Local limits development guidance appendices. Appendix Q – Methods for handling data below detection level. Office of Wastewater Management. 10 pp.

United States Department of Health and Human Services (1999). Toxicological profile for uranium. Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 462 pp.

United States Geological Survey, Department of the Interior (2000). Mdlwin: Calculating summary statistics for data below one or multiple detection limits. Practical Stats. <http://www.practicalstats.com>

Waterloo Hydrogeologic Inc. (1999). Visual Modflow 2.8 and User’s Guide, Waterloo, Ontario, Canada.

Williams, R. (2004). Analytic strategies: simultaneous, hierarchical and stepwise regression. Course Notes of Sociology Graduate Statistics I, University of Notre Dame, Australia, 18 pp.

Younger, P., Robins, N. (editors) (2002). Mine water hydrogeology and geochemistry. *Geological Society Special Publication*, **198**, London, 396 pp.

Apêndice I – Características dos furos

Data da colheita	Nível da água (m)	Prof. medida do furo (m)	Amostra superficial (≈ nível água)					Amostra de profundidade				
			Prof. da colheita (m)	pH	Temperatura (°C)	Condutividade (μS/cm)	Eh (mV)	Prof. da colheita (m)	pH	Temperatura (°C)	Condutividade (μS/cm)	Eh (mV)
28-03-2008	1.85	26	1.85	5.5	15.2	140	104	19.55	5.3	16.2	208.4	-23
26-09-2008	2.55		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26-03-2009	1.18		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25-09-2009	2.72		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela AI-1 – Características do Furo 1 (F1) e resultados de cada amostragem (dados de campo).

Data da colheita	Nível da água (m)	Prof. medida do furo (m)	Amostra superficial (≈ nível água)					Amostra de profundidade				
			Prof. da colheita (m)	pH	Temperatura (°C)	Condutividade (μS/cm)	Eh (mV)	Prof. da colheita (m)	pH	Temperatura (°C)	Condutividade (μS/cm)	Eh (mV)
28-03-2008	1.89	21.63	1.89	5.83	14.5	160.1	136	13.55	5.8	16	156.9	193
26-09-2008	2.35		2.35	6.55	19.1	255	138	13.55	6.79	17.6	230	-140
26-03-2009	1.01		1.01	6.55	14	257.8	-14	13.55	6.77	15.5	259.1	-73
25-09-2009	2.6		2.6	6.15	17.7	252	-81	13.55	6.514	16.2	263.8	-210

Tabela AI-2 – Características do Furo 2 (F2) e resultados de cada amostragem (dados de campo).

Data da colheita	Nível da água (m)	Prof. medida do furo (m)	Amostra superficial (≈ nível água)					Amostra de profundidade				
			Prof. da colheita (m)	pH	Temperatura (°C)	Condutividade (μS/cm)	Eh (mV)	Prof. da colheita (m)	pH	Temperatura (°C)	Condutividade (μS/cm)	Eh (mV)
28-03-2008	0.89	17.7	0.89	5.42	13.4	73.4	29	15.55	5.51	15.9	88	32
26-09-2008	1.16		1.16	5.47	19.4	85	67	15.55	5.4	17.1	90	41
26-03-2009	0.77		0.77	5.11	13.3	91.9	87	13.55	5.44	14.9	171.7	-55
25-09-2009	1.48		1.48	4.815	19.3	86.5	63	13.55	5.224	16.6	95.4	-21.4

Tabela AI-3 – Características do Furo 10 (F10) e resultados de cada amostragem (dados de campo).

Data da colheita	Nível da água (m)	Prof. medida do furo (m)	Amostra superficial (≈ nível água)					Amostra de profundidade				
			Prof. da colheita (m)	pH	Temperatura (°C)	Condutividade (μS/cm)	Eh (mV)	Prof. da colheita (m)	pH	Temperatura (°C)	Condutividade (μS/cm)	Eh (mV)
28-03-2008	0.36	59.65	0.36	7.02	13.8	196.5	96	28	6.66	17.3	206.2	-26
26-09-2008	1.35		1.35	6.44	19	268	60	28	6.86	19	248	-111
26-03-2009	0.07		0.07	6.01	13.3	207.8	-72	29.5	6.66	15.9	221.9	-106
25-09-2009	1.9		1.9	7.552	18.7	324.7	-157.3	29.5	7.473	17.4	295.5	-181.1

Tabela AI-4 – Características do Furo PP1 (PP1) e resultados de cada amostragem (dados de campo).

Data da colheita	Nível da água (m)	Prof. medida do furo (m)	Amostra superficial (≈ nível água)					Amostra de profundidade				
			Prof. da colheita (m)	pH	Temperatura (°C)	Condutividade (µS/cm)	Eh (mV)	Prof. da colheita (m)	pH	Temperatura (°C)	Condutividade (µS/cm)	Eh (mV)
28-03-2008	0.53	27.5	0.53	5.22	13.5	194.3	202	18.5	5.25	15.2	205.6	186
26-09-2008	0.42		0.42	8.46	19	242	-108	18.5	4.99	16	243	30
26-03-2009	0.35		0.35	5.7	13.3	192.2	180	18.5	5.45	14.9	97	197
25-09-2009	2		2	5.4	16.2	240.3	124	18.5	5.47	16.5	246.7	121.5

Tabela AI-5 – Características do Furo PP1A (PP1A) e resultados de cada amostragem (dados de campo).

Data da colheita	T° C (LAB)	C.E. (LAB)	pH (LAB)	CO ₂ (ppm)	Alcal. (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)	D.T. (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	F ⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	NO ₂ ⁻ (ppm)	Br ⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	PO ₄ ³⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	U (µg/l)
28-03-2008		112	6.39	12.6	48	58.6	58	18.4	19	9.7	2.9		2.7	12.9		0.11	5.1		4.7	<50
26-09-2008																				
26-03-2009																				
25-09-2009																				

Tabela AI-6 – Furo F1-S (Furo 1 - colheita superficial): resultados das análises às águas colhidas em cada uma das campanhas efectuadas (dados de laboratório).

Data da colheita	T° C (LAB)	C.E. (LAB)	pH (LAB)	CO ₂ (ppm)	Alcal. (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)	D.T. (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	F ⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	NO ₂ ⁻ (ppm)	Br ⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	PO ₄ ³⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	U (µg/l)
28-03-2008		160	6.31	31.4	70	85.4	104	32.8	29	1.4	5.3		2.1	14.8			1.2		3.5	<50
26-09-2008																				
26-03-2009																				
25-09-2009																				

Tabela AI-7 – Furo F1-P (Furo 1 - colheita em profundidade): resultados das análises às águas colhidas em cada uma das campanhas efectuadas (dados de laboratório).

Data da colheita	T° C (LAB)	C.E. (LAB)	pH (LAB)	CO ₂ (ppm)	Alcal. (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)	D.T. (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	F ⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	NO ₂ ⁻ (ppm)	Br ⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	PO ₄ ³⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	U (µg/l)
28-03-2008		150	7.23	9.8	76	92.7	78	24.8	18.9	8.2	3.9		2.3	10.6	0.38	0.09	2.6		3.7	<50
26-09-2008		228	7.72	8.0	94	115	78	23.2	23.5	5.5	4.9	95.7	0.67	11.73			1.08		5.43	5.7
26-03-2009		255	7.60	12.2	106	129	68	23.2	20.3	11.1	2.4	59.5	0.74	6.8					9.4	3.8
25-09-2009		236	7.30	26.4	98	119.6	66	24.8	22.9	13.1	0.97	33.8	1.1	11.6			11.7		7.47	2.8

Tabela AI-8 – Furo F2-S (Furo 2 - colheita superficial): resultados das análises às águas colhidas em cada uma das campanhas efectuadas (dados de laboratório).

Data da colheita	T° C (LAB)	C.E. (LAB)	pH (LAB)	CO ₂ (ppm)	Alcal. (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)	D.T. (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	F ⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	NO ₂ ⁻ (ppm)	Br ⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	PO ₄ ³⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	U (µg/l)
28-03-2008		175	7.63	5.4	90	110	86	24.8	21	3.7	5.8		1.6	8.8	0.001		0.78	0.35	2.8	<50
26-09-2008		224	7.67	9.0	101	123	76	24.0	22.8	4.2	3.9	81.8	0.68	14.19			0.86		4.64	5.5
26-03-2009		254	7.62	11.8	107	131	86	20.0	19.8	10.6	8.8	35.5	0.97	7.9			3.4		4.7	3.5
25-09-2009		251	6.68	53	105	128	72	25.6	24.5	12.0	1.95	43.2	1.2	12.6			17.8		5.7	3.2

Tabela AI-9 – Furo F2-P (Furo 2 - colheita em profundidade): resultados das análises às águas colhidas em cada uma das campanhas efectuadas (dados de laboratório).

Data da colheita	T° C (LAB)	C.E. (LAB)	pH (LAB)	CO ₂ (ppm)	Alcal. (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)	D.T. (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	F ⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	NO ₂ ⁻ (ppm)	Br ⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	PO ₄ ³⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	U (µg/l)
28-03-2008		73	6.92	29.6	37	45	28	7.2	12.2	9.6	2.4		0.98	5.3			1.8	0.87	3.25	<50
26-09-2008		152	6.43	32.6	36	43.9	46	16.0	14.1	0.14	1.5	89.9	0.52	6.93			1.11	1.62	2.14	15
26-03-2009		92	7.04	40.2	90	110	70	24.0	14.2	0.6	2.4	113	0.59	4.6					1.7	25
25-09-2009		79	6.38	111	38	46.4	52	19.2	16.9	0.55	0.98	36.2	1.04	8.9			3.1		3.3	18

Tabela AI-10 – Furo F10-S (Furo 10 - colheita superficial): resultados das análises às águas colhidas em cada uma das campanhas efectuadas (dados de laboratório).

Data da colheita	T° C (LAB)	C.E. (LAB)	pH (LAB)	CO ₂ (ppm)	Alcal. (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)	D.T. (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	F ⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	NO ₂ ⁻ (ppm)	Br ⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	PO ₄ ³⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	U (µg/l)
28-03-2008		79	6.96	26.6	38	46.4	88	30.4	12.6	9.3	2.9		0.99	5.7	0.006		1.12	0.96	3.1	<50
26-09-2008		105	6.71	21.6	72	87.8	22	8.0	12.3	0.40	0.5	85.6	0.33	7.56			2.89	5.76	3.24	26
26-03-2009		154	6.75	63.2	95	116	86	22.4	12.1	1.3	7.3	58.2	0.64	4.9					2.3	160
25-09-2009		84	6.62	136.6	35	42.7	56	4.8	12.4	2.29	10.7	40.2	0.84	8.6			0.59		5.69	13

Tabela AI-11 – Furo F10-P (Furo 10 - colheita em profundidade): resultados das análises às águas colhidas em cada uma das campanhas efectuadas (dados de laboratório).

Data da colheita	T° C (LAB)	C.E. (LAB)	pH (LAB)	CO ₂ (ppm)	Alcal. (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)	D.T. (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	F ⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	NO ₂ ⁻ (ppm)	Br ⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	PO ₄ ³⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	U (µg/l)
28-03-2008		196	7.72	3.0	105	128	80	24	29	3.0	4.9		2.8	10.7	0.003		3.2		3.3	<50
26-09-2008		244	7.48	6.0	107	131	74	18.4	45.7	2.5	6.8	58.4	1.27	15.12			1.89		2.02	1.6
26-03-2009		260	7.12	11.0	115	140	60	16.8	48.8	2.6	4.6	30.3	2.3	9.8			0.98		1.03	1.1
25-09-2009		304	7.35	18.6	128	156	70	20	40.6	4.8	4.9	18.3	1.39	20.3			1.6	1.3	5.95	<1

Tabela AI-12 – Furo PP1-S (Furo PP1 - colheita superficial): resultados das análises às águas colhidas em cada uma das campanhas efectuadas (dados de laboratório).

Data da colheita	T° C (LAB)	C.E. (LAB)	pH (LAB)	CO ₂ (ppm)	Alcal. (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)	D.T. (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	F ⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	NO ₂ ⁻ (ppm)	Br ⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	PO ₄ ³⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	U (µg/l)
28-03-2008		195	7.45	4.4	105	128	66	21.6	19.4	7.5	2.9		3.7	9.1			0.57		3.8	70
26-09-2008		241	7.93	4.0	112	137	66	17.6	38.1	2.7	5.4	41.3	1.18	13.61			0.82		1.87	<1
26-03-2009		261	7.76	7.0	114	139	56	17.6	43.1	2.5	2.9	61.2	3.6	11.5					0.6	<1
25-09-2009		278	7.74	3.4	123	150	58	22.4	45.0	2.4	0.48	19.3	1.07	17.5			2.4		5.3	<1

Tabela AI-13 – Furo PP1-P (Furo PP1 - colheita em profundidade): resultados das análises às águas colhidas em cada uma das campanhas efectuadas (dados de laboratório).

Data da colheita	T° C (LAB)	C.E. (LAB)	pH (LAB)	CO ₂ (ppm)	Alcal. (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)	D.T. (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	F ⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	NO ₂ ⁻ (ppm)	Br ⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	PO ₄ ³⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	U (µg/l)
28-03-2008		201	6.60	29.8	27	32.9	140	41.6	21	12.0	8.8		0.04	7.6			6.03	0.16	86.9	<50
26-09-2008		229	6.31	49	24	29.3	68	16.8	26.0	1.8	6.3	55.4	0.18	8.76			1.40		76.7	14
26-03-2009		245	6.50	51.0	20	24.4	64	14.4	26.8	1.1	6.8	8.4	0.32	7.2			0.76		81.4	15
25-09-2009		275	7.30	50	20	24.4	70	20.8	26.5	1.2	4.4	27.2	0.21	10.3		0.65	5.4	0.11	87.1	14

Tabela AI-14 – Furo PP1A-S (Furo PP1A - colheita superficial): resultados das análises às águas colhidas em cada uma das campanhas efectuadas (dados de laboratório).

Data da colheita	T° C (LAB)	C.E. (LAB)	pH (LAB)	CO ₂ (ppm)	Alcal. (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)	D.T. (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	F ⁻ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	NO ₂ ⁻ (ppm)	Br ⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	PO ₄ ³⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	U (µg/l)
28-03-2008		237	6.92	29	58	71	144	47.2	18.8	4.7	6.3		1.5	7.7	0.36		1.45	0.91	90.2	110
26-09-2008		251	6.17	38	23	28.1	76	20.8	22.4	0.7	5.8	77.3	0.20	7.58			1.05		79.7	48
26-03-2009		244	6.44	49.0	21	25.6	52	15.2	21.3	1.9	3.4	54.3	0.29	6.2			2.2		77.4	24
25-09-2009		234	6.35	68	22	26.8	98	34.0	25.2	0.88	3.2	29.5	0.03	7.8	0.25		5.42		89.4	20

Tabela AI-15 – Furo PP1A-P (Furo PP1A - colheita em profundidade): resultados das análises às águas colhidas em cada uma das campanhas efectuadas (dados de laboratório).

Apêndice II – Fotos da mina de Castelejo



Figura AII-1 – Céu Aberto I (CAI) [Foto de Abril de 2008].

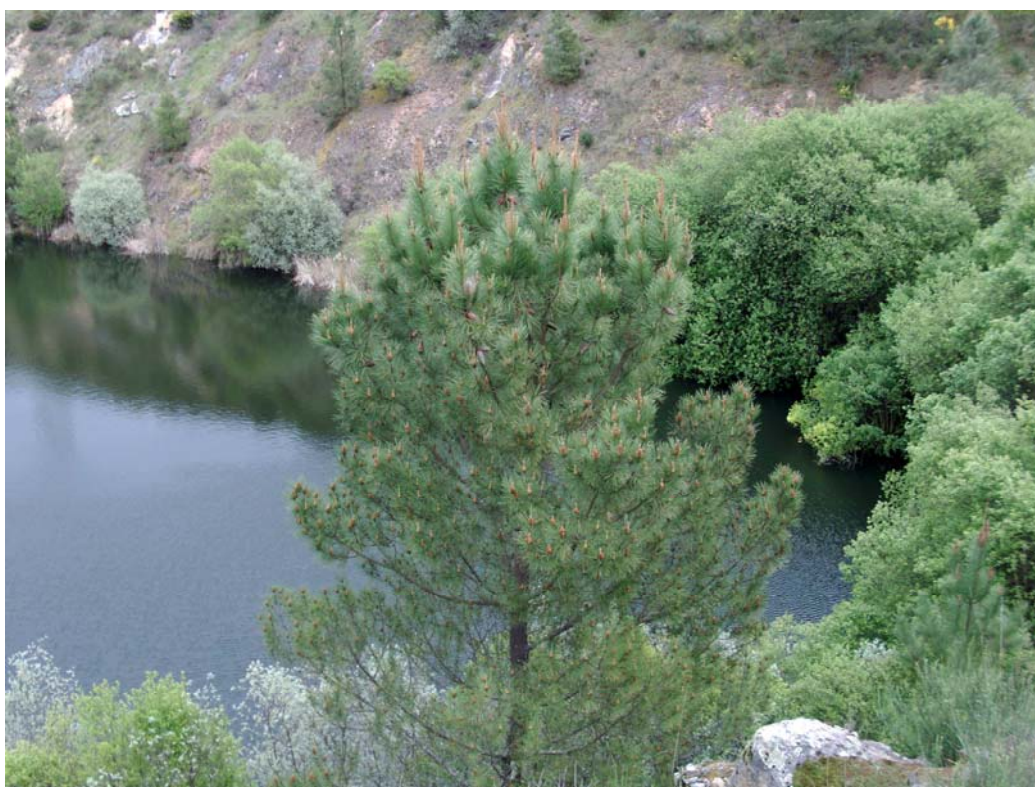


Figura AII-2 – CAI - Nova perspectiva, notando-se o crescimento de vegetação [Foto de Abril de 2008].



Figura AII-3 – Céu Aberto II (CAII) - Perspectiva do local de desmonte do filão [Foto de Abril de 2008].



Figura AII-4 – CAII – Outra perspectiva do local de desmonte do filão [Foto de Abril de 2008].



Figura AII-5 – CAII - Perspectiva do fundo, parcialmente seco (zona correspondente à área vermelha), sobre o qual se nota o crescimento de vegetação [Foto de Abril de 2008].



Figura AII-6 – CAII - A área vermelha corresponde à deposição sedimentar de metais oxidados (essencialmente ferro e manganês) sobre o fundo do Céu Aberto, na época em que o mesmo se encontrava totalmente inundado [Foto de Abril de 2008].



Figura AII-7 – CAII - Nova perspectiva do fundo, vendo-se também o guincho de elevação situado sobre um dos poços utilizados na caracterização preliminar da mina, mais tarde aproveitado para o processo de lixiviação ácida [Foto de Abril de 2008].



Figura AII-8 – CAII - Outra perspectiva do fundo do Céu Aberto [Foto de Abril de 2008].



Figura AII-9 – CAII - Ampliação da foto anterior [Foto de Abril de 2008].



Figura AII-10 – CAII - Ampliação da foto anterior, destacando-se o guincho de elevação e as tubagens que conduzem o efluente extraído à estação de tratamento [Foto de Abril de 2008].



Figura AII-11 – Dispositivo utilizado apenas na fase de laboração da mina, no processo de oxigenação do efluente extraído do CAII [Foto de Abril de 2008].



Figura AII-12 – Estação de neutralização do efluente extraído do CAII (actualmente recebe o efluente directamente do CAII, embora na fase de laboração da mina apenas recebesse o efluente após a sua passagem pela fase de oxigenação) [Foto de Abril de 2008].



Figura AII-13 – Outra perspectiva da estação de neutralização [Foto de Abril de 2008].



Figura AII-14 – Instalações da estação de neutralização [Foto de Março de 2009].



Figura AII-15 – Estação de neutralização: local de introdução da cal [Foto de Março de 2009].



Figura AII-16 – Estação de neutralização: circuito de passagem da solução de cal[Foto de Março de 2009].



Figura AII-17 – Estação de neutralização: tanque de adição de cal ($\text{pH} \approx 8-9$) [Foto de Março de 2009].



Figura AII-18 – Estação de neutralização: tanque de adição de cloreto de bário [Foto de Março de 2009].



Figura AII-19 – Estação de neutralização: novo tanque de adição de cal, com vista ao aumento do pH para valores próximos de 10 [Foto de Março de 2009].



Figura AII-20 – Estação de neutralização: canal de saída do efluente em direcção às lagoas de tratamento [Foto de Março de 2009].



Figura AII-21 – Lagoas de tratamento do efluente proveniente da estação de neutralização, notando-se o revestimento plástico, com vista à impermeabilização do leito [Foto de Abril de 2008].



Figura AII-22 – Outra perspectiva das duas lagoas de tratamento do efluente proveniente da estação de neutralização, vendo-se a lagoa superior, de decantação, e a lagoa inferior, de aeração, após o que se sucede a descarga no meio hídrico [Foto de Abril de 2008].